

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14264

研究課題名(和文)光ファイバの高次縮退直交モードを用いる超高符号効率多次元多値モード変調

研究課題名(英文) Multi-dimensional multi-level mode modulation with ultra-high spectral efficiency using higher order degenerate modes in optical fiber

研究代表者

國分 泰雄 (Kokubun, Yasuo)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60134839

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：数モードファイバの直交固有モードを多次元変調の次元に用いる多次元多値変調による高符号高率伝送を目指して、そのモード分離に新しい原理に基づく高速モード分析法を考案し、これを用いた固有モード受信機を提案して、この高速モード分析システムの光学系を構築した。2年度目では、数モードファイバを伝播する真の固有モードをLP(Linearly Polarized)モード選択励振と近視野像観察から明らかにして、単一コア数モードファイバでは初年度に再構築した理論通りの固有モードが伝播すること、マルチコア数モードファイバでは理論に反してLPモードが固有モードとして伝播することを発見した。

研究成果の概要(英文)：To realize the multi-dimensional/multi-level modulation using orthogonal degenerate modes in few-mode fibers (FMFs), we proposed a novel high-speed mode detection method, which can obtain a full set of amplitudes, phases, and polarization states of guided modes including degenerate modes in few-mode fibers within the speed limit imposed by the response time of the electronics. The mode discrimination system using this method was developed in the first year. In the second year, we observed the near-field patterns of light output from FMFs in which an LP (linearly polarized) mode was selectively excited. It was confirmed from the variation of the intensity profile with the wavelength that the true eigenmodes of a circular core fiber are guided in single-core step-index and graded-index FMFs. On the other hand, we discovered a new phenomenon that LP modes propagate as eigenmodes oriented along a specific axis in 4-LP mode 12-core FMF.

研究分野：工学，光エレクトロニクス

キーワード：多次元変調 モード変調 多値変調 固有モード 光ファイバ モード分析 モード受信機

## 1. 研究開始当初の背景

光ファイバ伝送の超大容量化を目指す新しい取り組みとして、空間多重、モード多重、多値変調を組み合わせる 3m 技術が 2008 年に提唱され、空間多重とモード多重の組み合わせによって 2015 年 3 月には 108 空間チャンネルが実証されていた(報告者も参画)。さらなる大容量化には多値変調を組み合わせる必要があるが、従来の単一キャリアの位相と振幅に変調を加える QAM (Quadrature Amplitude Modulation) では多値度を上げると符号間距離が大幅に狭まって S/N 比の劣化により長距離大容量伝送が困難になる問題があった。

## 2. 研究の目的

光ファイバ 1 本当たりの伝送容量は 2008 年までは 100Tbps が限界とされてきたが、光ファイバ 1 本に多くのコアを収納するマルチコアファイバ(Multi-core fiber: MCF)や 1 つのコアで数個のモードを伝送する数モードファイバ(Few-mode fiber: FMF)、およびこれらを組み合わせた FM-MCF によって 2015 年 9 月には 2Pbps まで大容量化が達成されていた。しかしながら、更なる大容量化には、搬送波である光の位相と振幅に変調を加える多値変調方式である QAM 変調の多値度を上げる必要がある。QAM では 2 次元の IQ 空間内で信号点を増やして多値度を上げ、これまでに 2048QAM が実験室レベルで報告されているが、非常に多くのデータ処理をオンラインで処理するのは困難であり、伝送されたデータを一旦メモリに蓄積してから復調する方式(オフライン)での実証に留まっていた。実際の伝送に近いオンラインでは 16QAM までであり、64QAM が次の目標とされていた。

この QAM で多値度を上げると、信号点間の符号間距離が狭まって S/N 比が劣化して、長距離伝送が困難になる。一方、近年、変調空間の次元を増やす方式として、直交偏光間の位相と各直交偏光成分の位相に変調を加える 3 次元変調(偏波変調)が提案され、信号点間距離を 8 値 QAM の 1.5 倍に拡大できることが示されたが、単一モードファイバでの変調次元の拡大は 3 次元までが限界であった。

この問題を解決する方法として、報告者は数モードファイバ(FMF)の高次縮退直交モードを用いる方法を提案した。この方法では、7 次元の変調空間によって符号効率を大幅に向上させつつ信号点間距離を 8 値 QAM の約 8 倍にできる特長がある。また、高次縮退直交モードの分離には従来はモード分波器を必要としたが、報告者は新たにモード分波器を必要とせず、4 象限分割光検出器と偏波分離器およびコヒーレント検出光学系によって各縮退直交モードの振幅と位相を検出するモード受信機を発明

していた(特許申請済み)。本研究では、このモード受信機を構築して、多次元多値モード変調方式の可能性を実証することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず初年度にモード受信機の基本動作を確認し、2 年度目に多次元モード変調の実証を行う計画で研究を開始した。モード受信機の要素は 4 象限分割光検出器(市販品あり)とその 4 ポート出力の中間周波数の信号処理システムであり、初年度には FPGA を用いた信号処理システムの構築を目指した。

2 年度目にはモード変調回路を構築して、初年度に構築するモード受信機と組み合わせた多次元モード変調・復調の実証を目指す予定であったが、初年度の研究遂行中に、直交偏光縮退モードとして用いる予定であった LP モード(Linearly Polarized mode)は実際には縮退しておらず、この LP モードを多次元変調の基底次元に用いることができないことが明らかになった。そこでまず、多次元変調の基底次元に用いるモードについての理論的考察に立ち戻って、多次元変調の基底に用いるモードとは何か、そのモードの伝播特性が確かに多次元変調の基底に用いられるかどうかの実験的検証、多次元変調の基本となるモード合分波器をどのように構成するか、についての理論的および実験的検討を進めた。

## 4. 研究成果

### (1) モード受信機:

モード受信機とは伝送信号に追従可能なほどの高速にモード分析を行うモード分析システムのこと、報告者らは Polarization-split Segmented Coherent Detection (PSCD) 法と呼ぶ高速モード分析法を発明していた[1]。図 1 に PSCD 法[1]の構成の概要を示す。数モードファイバからの信号光を、レンズを用いて平行ビーム化し、局部発振光と合波させる。次に、偏光ビームスプリッタを用いて干渉光を  $x$  偏光成分、 $y$  偏光成分に分離させる。そして、各偏光成分に分離された干渉光を 4 分割光検出器を用いてヘテロダイン検波し、各象限の光検出器で検出された中間周波数の電気信号の行列演算から各モードの振幅、位相差を求める手法である。このシステムを実際に構築する際には、局部発振光として信号光を偏波保持ファイバカプラで分岐させ、その一方に鋸歯状波による位相変調をかけて周波数をシフトさせるセラダイン方式を採用した。

PSCD 法の理論[1]を拡張し、4 分割から 8 分割の光ディテクタを用いることで LP<sub>21</sub> モードも含めた高次モードにも式(1)のように、適応させることができることを明らかにした。さらに光ディテクタを半径方向に

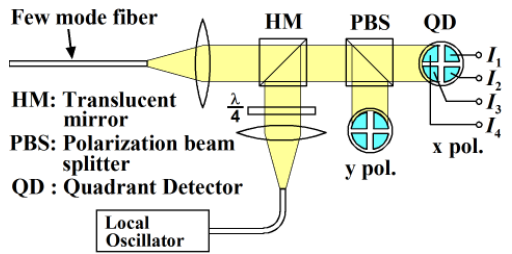


図1 PSCD法による高速モード分析システム (モード受信機) の概要

$$\begin{bmatrix} 4\sqrt{2}\chi B_x^e e^{-j\phi_1} \\ 4\sqrt{2}(\sqrt{2}-1)\chi B_x^o e^{-j\phi_3} \\ 4\chi C_x^e e^{-j\phi_5} \\ 4\chi C_x^o e^{-j\phi_7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1AC}^{(x)} \\ I_{2AC}^{(x)} \\ I_{3AC}^{(x)} \\ I_{4AC}^{(x)} \\ I_{5AC}^{(x)} \\ I_{6AC}^{(x)} \\ I_{7AC}^{(x)} \\ I_{8AC}^{(x)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{N_{01} w_0^2 \sqrt{2}}{4e} \{e\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(1) - 2\} = \chi$$

も2分割することで、LP<sub>02</sub>モードも導出可能である。

さらに4分割光ディテクタがσだけ回転して光を受光した場合、x偏光のevenとoddモードの複素振幅は式(2)で求めることができる。(ただし、ηはLP<sub>11</sub>モードの電界を積分したときに得られる定数)。

$$\begin{bmatrix} B_x^e \\ B_x^o \end{bmatrix} = \frac{1}{2\eta} \begin{bmatrix} u & -v \\ v & u \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{1AC}^x \\ I_{2AC}^x \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$u = \cos \sigma - \sin \sigma, \quad v = \cos \sigma + \sin \sigma$$

次に参考文献[1]で導出した計算式と式(2)の精度の確認のため、計算機シミュレーションを行った。各モードの振幅と位相差を設定し、各検出器面で検出される電気信号を計算し、それらからLP<sub>11</sub>モードの成分が導出できるかどうか検討した。4分割光ディテクタがσだけ回転して光を受光した場合、振幅B<sub>xe</sub>、B<sub>xo</sub>をある割合で入力した時、参考文献[1]のσを考慮していない逆算式と式(2)の逆算式から導出された各振幅と真値の差をディテクタの角度を変化させて求めた結果を図2に示す。また、同じ割合の振幅のときの位相差の算出誤差の変化も図3に示す。図2、図3より角度が大きくなるにつれて、以前の逆算式では真値との差は大きくなり、これはLPモードの電界を各象限ごとに積分する際に積分範囲がσ [rad] だけずれてしまうため、誤差が生じ

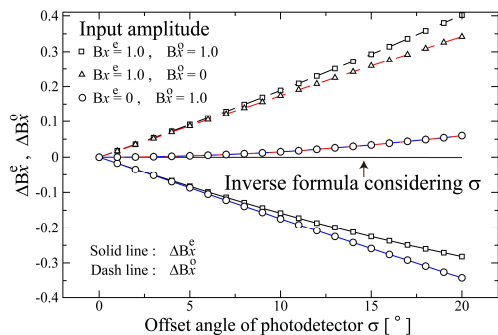


図2 ディテクタの傾き角σに対する検出されたモード振幅の真値との誤差

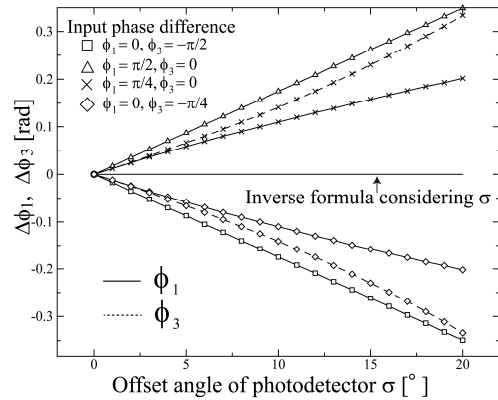


図3 ディテクタの傾き角σに対する検出されたモードの位相差の真値との誤差

ると考えられる。一方、式(2)を用いれば正確にモード複素振幅を求めることができる。

さらに参照光の中心軸がずれた場合の真値との差を計算した。平行ビーム時の信号光と参照光のスポットサイズの比率が0.63のときの振幅の誤差のシミュレーション結果を図4に示す。モードを分析する際、原理的には検出器から検出される4つのうちの2つの信号を用いると分析が可能であるが、検出される4つの信号全てを用いることによって計算誤差を小さくすることが分かった。さらに、信号光と参照光のスポットサイズの比率を1に近づけることによって計算誤差を小さくできることも分かった。位相差についても同様で、4つの検出信号を用いることで誤差を0に近づけることが可能であることが分かった。

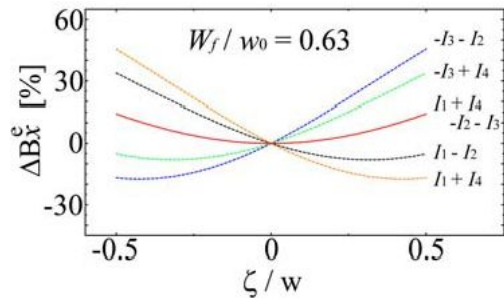


図4 2つのビームの中心軸がζだけずれた場合の検出されたモード振幅の真値との誤差

## (2) 光ファイバの真の伝播モードの理論的検討と厳密固有モード合分波器の設計:

超大容量光ファイバ伝送のためのモード多重化用ファイバとして、コア径を拡大して伝搬モード数を増やした数モードファイバ (Few Mode Fiber: FMF) が提案されている。この数モードファイバを導波するモードは、理論及び伝送実験においてLPモード[2]として扱われてきたが、これは厳密な固有モード[3]の線形結合で表される近似モードである。しかしながら、LPモードを構成する厳密な固有モード間の伝播定数差が近年まで明らかにされなかったこともあり[4]、

40年以上にわたってLPモードが光ファイバの固有モードとして扱われ、かつ超大容量モード多重伝送実験[5]の伝送チャンネルにも用いられて来た。

例えば1次モードである各LP<sub>11</sub>モードと対応する厳密な固有モードの関係は、以下の行列で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} LP_{11-x}^{even} \\ LP_{11-y}^{odd} \\ LP_{11-x}^{odd} \\ LP_{11-y}^{even} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} TM_{01} \\ HE_{21}^{even} \\ HE_{21}^{odd} \\ TE_{01} \end{bmatrix} \quad (3)$$

この逆行列は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} TM_{01} \\ HE_{21}^{even} \\ HE_{21}^{odd} \\ TE_{01} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} LP_{11-x}^{even} \\ LP_{11-y}^{odd} \\ LP_{11-x}^{odd} \\ LP_{11-y}^{even} \end{bmatrix} \quad (4)$$

LP<sub>11-x</sub><sup>even</sup>モードを例にとるとHE<sub>21</sub><sup>even</sup>モードとTM<sub>01</sub>モードの合成であり、その伝搬定数差によって図5のように強度分布が変化し、その周期は数m~数十mである[4],[6]。単に強度分布が変化するだけでなく、電界の偏光状態が局所的に変化して、場所に依存した楕円偏光になる(この楕円偏光状態を解析した論文はない)[6]。現状のモード多重伝送では光源のレーザーダイオードからの出射光が直線偏光であるため、数モードファイバの入射端ではLPモードが励振される。しかし、上述したようにLPモードは伝送に伴って電磁界分布が変化して出射端ではLPモードではないので、伝送チャンネルの再生にMIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 信号処理が必要になり、伝送遅延が発生する。この問題を解決するため、本研究では固有モード多重伝送を提案した[6]。

HE<sub>21</sub><sup>even</sup>+TM<sub>01</sub> → TMH group

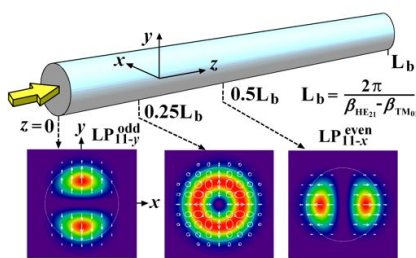
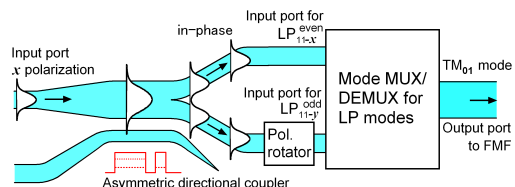


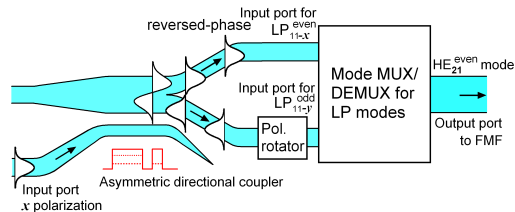
図5 LP<sub>11-y</sub><sup>odd</sup>モードからLP<sub>11-x</sub><sup>even</sup>モードへの電磁界分布の遷移の様子

式(4)よりLP<sub>11</sub>モード用合波器のLP<sub>11</sub><sup>even</sup>とLP<sub>11</sub><sup>odd</sup>モード用入力ポートに、TM<sub>01</sub>モードは同相(図6(a))で、またHE<sub>21</sub><sup>even</sup>モードは逆相(図6(b))で入射させればこれらの厳密固有モードを選択励振できる。この機能は図6のような非対称方向性結合器と等分岐回路に偏波回転器とLPモード用モード合分波器を接続した光導波回路で実

現できる。TE<sub>01</sub>とHE<sub>21</sub><sup>odd</sup>モードのモード合波には、LP<sub>11-y</sub><sup>even</sup>とLP<sub>11-x</sub><sup>odd</sup>モードを同相及び逆相で入射させればよく、4モード全てを合波するには入力ポートそれぞれに偏波合波器を付加すればよい。また、同様の機能は非対称X合流分岐導波回路や、空間ビーム型では適切なプリズムを用いれば実現可能である。さらに受信側では、(1)で述べた4分割光検出器と偏波分離コヒーレント検出を用いた高速モード分析器[1]を利用できる。



(a) TM<sub>01</sub>モードを合波させる場合



(b) HE<sub>21</sub><sup>even</sup>モードを合波させる場合

図6 厳密固有モード合波器の原理

この原理に基づいて、誘電体光導波路を用いて厳密固有モード合波器を設計・試作した。しかしながら、製作プロセスにおける製膜条件およびエッチング条件の最適化を行った後にデバイスを製作したにもかかわらず、導波路パターンのエッチング時に導波路幅が設計値よりも大幅に狭くなってしまいう現象が起きてデバイスの実証には至らなかった。

### (3) 光ファイバの真の伝播モードの実験的解明と新たな発見:

実際のファイバ中の固有モード伝播を確認する方法として、図7のような測定系を構築したLPモード励振器でLP<sub>11</sub>モードを励振し、ファイバ出射端で偏光フィルタを回転させて、光源の波長を変化させた際の近視野像を観測した。

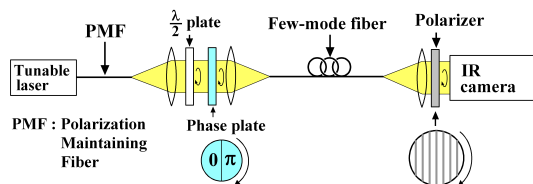


図7 LPモード選択励振と近視野像観察による固有モード伝播測定系

コアが中心にのみ存在する単一コア階段屈折率2LPモードファイバを用いて測定したところ、図8のように波長を変化させた

ときにモードパターンが変化し、直線偏光のLP<sub>11</sub>モードパターンや局所的な楕円偏光となっているドーナツ状に近いパターンが出現した。これは厳密固有モード間の干渉によって説明ができる。

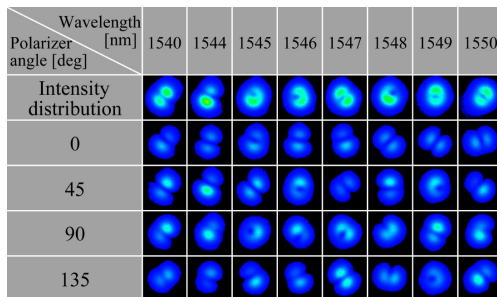


図8 単一コア階段屈折率2モードファイバの出射光近視野像の観測結果

一方で4モード12コアファイバの周辺コアに、ある方位角(コア中心とファイバ中心を結ぶ線から35°方向)で入射させると図9のように波長を変化させても入射モードがそのまま出射端でも確認することが出来た。これは単一コアファイバでは観測されなかった結果であり、LP<sub>11</sub>モードがこの方位角方向で固有モードになったためと考えられる。また、基本モードであるLP<sub>01</sub>モードを選択励振した場合には、単一コア2LPモードファイバでは出射光は直線偏光で波長を変えても変化しなかったが、4LPモード12コアファイバでは偏光状態が変化した。

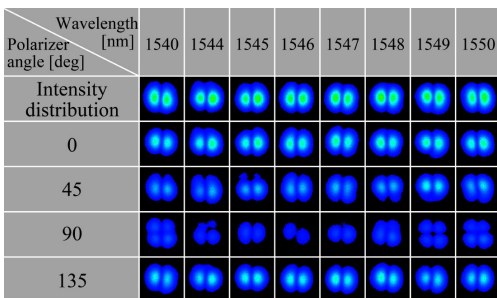


図9 4モード12コアファイバの出射光近視野像の観測結果

緩衝フッ酸 (BHF) を用いてステンエッチングしたファイバ断面を光学顕微鏡で観察したところ、それぞれのファイバのコア楕円率は単一コアファイバで3.7%、4モード12コアファイバの周辺コアで平均4.9%程度と判明したが、楕円率に大きな差はないため、コアの楕円変形ではなく、別の原因(ファイバ製造時の残留応力など)によって生じた現象であると推定される。しかしながら、この原因は未解明である。

#### <引用文献>

渡邊達彦, 河田凌, 國分泰雄, “4象限分割光検出器と偏波分離コヒーレント検出

による縮退直交偏光モードの瞬時モード分析法”, 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 東北大学, B-10-12, 2015年9月10日。

D. Gloge, "Weakly guiding fibers," Applied Optics, vol.10, no.10, pp.2252-2258, 1971.

E. Snitzer, "Cylindrical dielectric waveguide modes," J. Optical Society of America, vol.51, no.5, pp.491-498, May 1961.

H. Kogelnik, P. J. Winzer, "Modal birefringence in weakly guiding fibers," J. Lightwave Technology, vol.30, no.14, pp.2240-2245, July 2012.

D. Soma, K. Igarashi, Y. Wakayama, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, N. Yoshikane, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, "2.05 Peta-bit/s super-Nyquist-WDM SDM transmission using 9.8-km 6-mode 19-core fiber in full C band," European Conference on Optical Communication (ECOC2015), Valencia, PDP3-2, 2015.

Y. Kokubun, T. Watanabe, S. Miura, R. Kawata, "What is a mode in few mode fibers?: Proposal of MIMO-free mode division multiplexing using true eigenmodes" IEICE ELEX, vol.13, no.18, pp. 20160394, 2016.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

T. Yamaguchi, S. Miura, Y. Kokubun, "Demonstration of true-eigenmode propagation in few-mode fibers by selective LP mode excitation and near-field observation," IEICE Elect. Express (ELEX), 査読有, vol.15, no.10, pp.20180344, May 25, 2018.

S. Miura, T. Watanabe, Y. Kokubun, "Accurate analysis of crosstalk between LP<sub>11</sub> quasi-degenerate modes due to offset connection using true eigenmodes," Photonics Journal, 査読有, vol.10, no.1, pp.1-11 (7900811), February 1, 2018.

DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2786706

R. Kawata, T. Watanabe, Y. Kokubun, "Full-set high-speed mode analysis in few-mode fibers by polarization-split segmented coherent detection method: Proposal and simulation of calculation error," IEICE Elect. Express (ELEX), 査読有, vol.15, no.1, pp.1-12, Jan. 10, 2018.

DOI: 10.1587/elex.14.20171132

Y. Kokubun, T. Watanabe, S. Miura, R. Kawata, "What is a mode in few mode fibers?: Proposal of MIMO-free mode

division multiplexing using true eigenmodes," IEICE Elect. Express (ELEX), 査読有, vol.13, no.18, pp.1-12 (June 3, 2016)

DOI: 10.1587/elex.13.20160394

Y. Kokubun, T. Watanabe, R. Kawata, K. Morita, "Full set mode analysis of three mode fibers calculated from polarization components of Near-Field Pattern," Jpn. J. Appl. Phys. (MOC'15 Special Issue), 査読有, vol.55, 08RB03, July 11, 2016. <http://doi.org/10.7567/JJAP.55.08RB03>

〔学会発表〕(計 23 件)

國分泰雄, 千葉貴史, 川上彰二郎, "数モードファイバのLP11 固有モード伝播の主軸形成要因に関する考察", 2018年電子情報通信学会総合大会, 東京電機大学, B-10-5, 2018年3月21日.

國分泰雄, "モード多重光ファイバの入出力技術とモード分析技術", (招待講演) 電子情報通信学会光通信インフラの飛躍的高度化に関する研究専門委員会 (EXAT 研究会), 沖縄県立博物館講座室, EXAT2017-18 (予稿集 pp.21-26), 2018年2月15日.

T. Yamaguchi, S. Miura, Y. Kokubun, "Observation of eigenmode propagation in few-mode fibers by selective LP mode excitation," 22nd Microoptics Conference (MOC2017), Tokyo, D-5, Nov. 21, 2017.

Y. Kokubun, "50 Years of Fibers and Integrated Optics," (Invited) 22nd Microoptics Conference (MOC2017), Tokyo, AS-3, Nov. 19, 2017.

Y. Kokubun, "Mode division multiplexing in optical fiber transmission - Review of mode theory, analysis and multi/demultiplexing -," (Keynote speech) Special ECOC Symposium, Copenhagen (Denmark), Sept. 15, 2017.

國分泰雄, "光ファイバのモード - モード理論の再点検と近視野像観測からの考察 -," (依頼講演), 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 東京都市大学, C-3-7, 2017年9月12日.

河田凌, 田中真琴, 國分泰雄, "偏光分離領域分割コヒーレント検出法による測定の計算精度の検討", 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 東京都市大学, B-10-3, 2017年9月12日.

國分泰雄, 田中真琴, 河田凌, "数モードファイバの固有モード伝播の観測 - 中心コアと外周コアの比較 -," 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 東京都市大学, B-10-2, 2017年9月12日.

國分泰雄, 山口拓人, 三浦聖矢, "数モードファイバのモード選択励振による固有モード伝搬の観測" 電子情報通信学会光通

信システム研究会, OCS2017-24 (電子情報通信学会技術研究報告 ISSN 0913-5685, vol.117, pp.7-12), 北海道大学, 2017年8月31日.

Y. Kokubun, S. Miura, T. Yamaguchi, "Proposal of Extended Jones Vector and Its Application to Design of Mode and Polarization Rotator," The 24th Congress of International Commission for Optics (ICO-24), Tokyo, Tu1E-06, Aug. 22, 2017.

Y. Kokubun, "Behavior of modes in few mode fibers - Review of mode theory and mode analysis -," (invited talk), 4th International Symposium on extremely advanced transmission technology (EXAT 2017), Nara, W2.1, June 7, 2017.

國分泰雄, "多モード光ファイバ中の厳密固有モードと多重伝送の再検討" (招待講演) 日本学術振興会光ネットワークシステム技術第171委員会第61回研究会, ニューウェルシティ湯河原, 予稿集 pp.17-26, 2017年6月5日.

(他 11 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 伝送装置、及び伝送方法  
発明者: 國分泰雄, 渡邊達彦  
権利者: 横浜国立大学  
種類: 特許(PCT 出願)  
番号: PCT/JP2016/73965  
出願年月日: 2016年8月17日  
国内外の別: 日本

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
國分 泰雄 (KOKUBUN, Yasuo)  
横浜国立大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 6 0 1 3 4 8 3 9

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

渡邊 達彦 (WATANABE, Tatsuhiko)  
河田 凌 (KAWATA, Ryo)  
三浦 聖矢 (MIURA, Seiya)  
山口 拓人 (YAMAGUCHI, Takuto)  
田中 真琴 (TANAKA, Makoto)