

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560382

研究課題名(和文) 3次元ベクトル有限要素ビーム伝搬法による光回路のトポロジー最適設計に関する研究

研究課題名(英文) A study on topology optimization method based on finite element and beam propagation method for photonic circuit devices

研究代表者

辻 寧英 (Tsuji, Yasuhide)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70285518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：高速大容量光通信システム実現のための高性能光デバイスの自動最適設計法の確率を目指し、数値解析に有限要素法およびビーム伝搬法を用いた最適設計法の開発を行った。具体的に、設計領域内の構造の数値パラメータによる表現と構造の単純化についての検討、有限要素法の高精度化を目指してアダプティブメッシュと高次要素についての検討、より大域的な最適解を効率的に見出すための最適化手法の検討を行った。これらの検討に基づき分岐素子、波長分離素子を始とする各種光デバイスの最適設計を行いその有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In order to establish the automatic optimal design method to realize high performance optical devices, which are required in the future high-speed and large-capacity photonic network, the optimal design method based on finite element and beam propagation method has been developed. First, the numerical expression method of refractive index distribution in the design region and the simplification of the optimized structure have been discussed. Next, in order to improve the numerical accuracy of finite element method, the adaptive mesh generation and the higher order edge/nodal hybrid element has been developed, and the search algorithms of global optimal solution have been also discussed. Finally, in order to confirm the developed automatic optimal design method, several kinds of photonic devices have been actually designed.

研究分野：理工系・工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：トポロジー最適設計 光回路デバイス 有限要素法 ビーム伝搬法

1. 研究開始当初の背景

インターネットを始めとする通信需要の増大にともない超高速・超大容量光通信システムを実現すべく各種の新しい光デバイスの開発が現在もなお進められている。研究開始当初から、光導波路デバイスの設計にはコンピュータを用いた数値シミュレーションが不可欠になっており、有限要素法(FEM)、ビーム伝搬法(BPM)、時間領域差分法(FDTD)を始めとする様々な数値解析法が開発され、実際の光導波路デバイスの設計・開発に利用されていた。しかしながら、当初の光導波路デバイスの設計は、従来からある構造の改良が主であったり、発見的な方法であっても設計者の過去の経験によるところが大きく、まったく新しい発想のデバイス構造を見出すことは難しい。こうしたなか、デバイスに要求される特性を与えることで、その特性を実現する構造を自動的に生成させる、自動最適設計の研究への関心が高まっていた。自動最適設計では、設計者の既成概念にとらわれずにまったく新しいデバイス構造を創出することが可能であり、さらにその構造に改良を加えていくことで、新しい発想の光デバイスが見出されることが期待される。

光導波路デバイスの最適設計法としてそれまでもいくつかの検討があり、生物の進化の過程を模擬した遺伝的アルゴリズムでは、導波路構造を表す数値パラメータを遺伝子情報として持った染色体に遺伝的操作を適用し優秀な個体を残していくことで最適な構造パラメータを見出す。この場合、最適解を得るまでに非常に多数回の光導波路解析を必要とすることになる。一方、トポロジー最適化は初期条件を与えなくても最適化を行うことができ、まったく新しい構造を創出でき、山登り探索であるため、比較的少ない反復回数で最適構造を見出すことができる。しかしながら、トポロジー最適化に関する研究は2次元光導波路デバイスに対しての報告があるのみで、より実的な3次元光導波路デバイスの設計へのトポロジー最適化の拡張が求められていた。

2. 研究の目的

光通信のさらなる高速化を実現するためには、既存の知識に頼らない新たな設計理論に基づく高性能な光導波路デバイスの設計も必要となっている。本研究では設計領域と使用する材料を設定し、目的の特性を与えるだけで、自動的に目的とする光導波路デバイスを設計してくれるような計算機による自動最適設計法の開発を目的とする。特に、これまで2次元光導波路デバイスへの適用が主であったトポロジー最適設計法をより実的な3次元光導波路デバイスの場合に適用できるように各種要素技術についての検討を行い、様々な問題に柔軟に適用できるような自動最適設計法の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 設計領域内の構造表現に関する検討

最適設計においては設計領域内の最適設計領域内の構造を数値パラメータで表現することが必要である。このための方法として申請者は関数展開法を提案しているが、問題によっては最適化構造が複雑化し、作製に適さない場合がある、ここでは用いる関数系についての検討や構造単純化フィルタの適用などにより目的の特性を実現するデバイスをより実的な構造で実現する。

(2) 有限要素解析の精度向上に関する検討

有限要素ビーム伝搬法では伝搬方向に有限要素分割を更新しながら逐次伝搬解析を行うが界の保管精度が低いと計算誤差の蓄積によるスプリアスなパワーの減衰が生じる。このため有限要素法の解析精度の向上のための高次要素についての検討を行う。

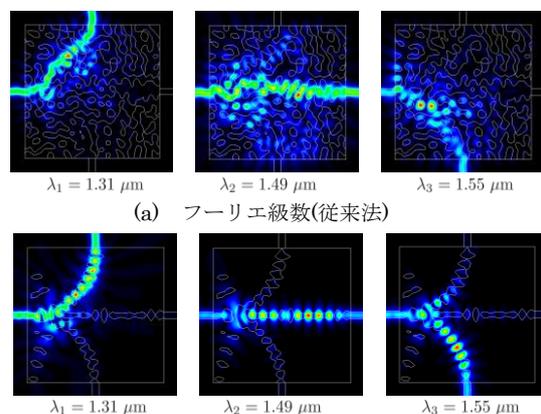
(3) 最適化手法に関する検討

山登り探索に基づくトポロジー最適化では局所解に陥ってしまい大域的最適解にたどり着けない問題がある。ここでは、より大域的な最適解の探索のために進化型の最適化手法の検討を行い、トポロジー最適化とのハイブリッド最適化についての検討を行う。

4. 研究成果

(1) 設計領域内の構造表現に関する検討

関数展開法を用いた構造表現において従来用いていたフーリエ級数の他に、より局所的な関数を用いた最適設計についての検討を行った。フーリエ級数では各展開関数は設計領域全体に広がっているため、特性改善のために局所的に構造を変化させようとしても設計領域全体の構造を更新してしまう。このことは、より大域的に解を探索するためには有利であるとも考えられるが、問題によっては最終的に得られる構造が複雑化してしまうという問題がある。そのため、より局所的な関数である sinc 関数とピラミッド関数の導入を試みた。小型3波長分離素子に対する最適化構造と光の分離の様子を図1に示す。

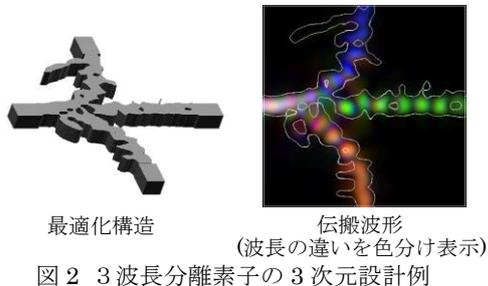


(a) フーリエ級数(従来法)

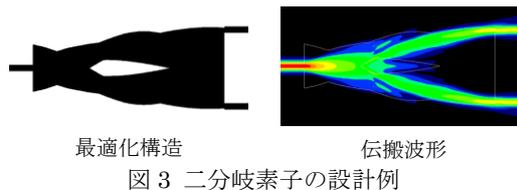
(b) ピラミッド関数(提案法)

図1 3波長分離素子の設計例

従来の方法では特性自体は良いものの構造が複雑化しているのに対して、局所化したピラミッド関数を用いた場合には構造が単純化していることがわかる。図1の結果は2次元導波路に対する結果であるがピラミッド関数を用いた3次元設計の例を図2に示す。3次元設計にも同様に適用可能であることが示されている。



その他の構造表現の方法についても検討を行い特にビーム伝搬法との親和性の高い構造表現の方法として伝搬方向への任意曲線関数による構造表現も有効であることを示した。図3に2分岐光素子の設計例を示す。非常に単純な構造で特性の良い二分岐素子が実現できている。



(2) 有限要素解析の精度向上に関する検討

図4に偏波変換素子の有限要素ビーム伝搬法(FE-BPM)による解析結果を示す。図の右側に分割数の異なる解析に対する入出力波形を示す。図の上段の界分布の方が分割の粗い場合の結果であるが、分割が不足している場合にはスプリアスな界の減衰が見られている。これは図5に示すように分割を光の伝搬方向に逐次更新していくため、界の補間精度が十分でない場合には有限要素分割の更新ごとに補間誤差が蓄積するためである。

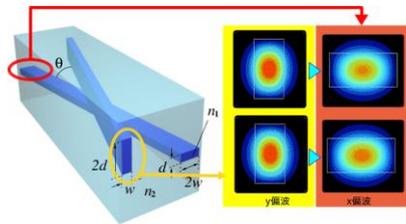


図4 FE-BPMでのスプリアスなパワーの減衰

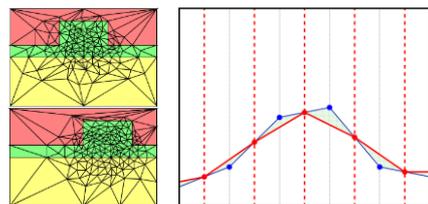


図5 分割の更新による補間誤差の蓄積

この問題を解消するために、従来用いられていた2次要素であるLT/QN要素よりも高次の要素として3次要素であるQT/CuN要素についての検討を行った。図6にリブ導波路の解析を例に、用いた要素と離散化に対する実効屈折率の収束の様子、およびそのときの電磁界分布を示す。QT/CuN要素を用いることでより少ない未知数で高い精度の解析を行えることが示されている。また、界分布に対して同程度の未知数に対してより滑らかな界分布が得られており、QT/CuN要素を用いることで界の補間精度を大幅に改善しFE-BPM解析の精度を改善できることが示された。

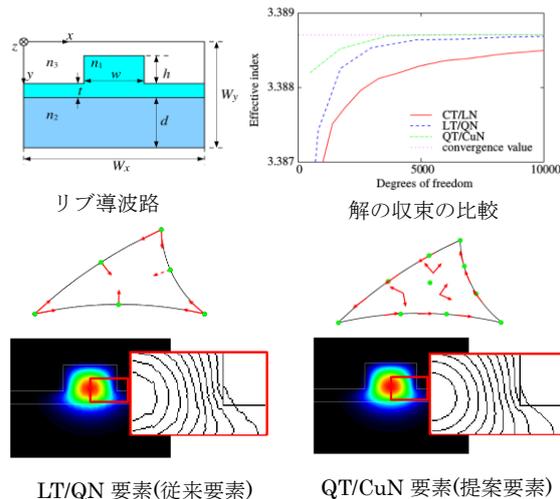
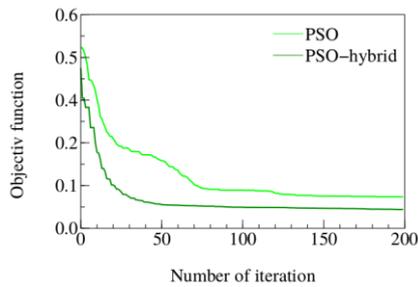


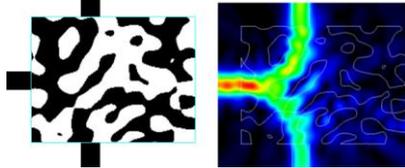
図6 解の収束と界の補間精度の比較

(3) 最適化手法に関する検討

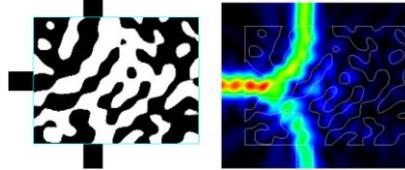
山登り探索に基づく最適設計では、局所解を見つけてしまい大域的な最適解を見出せない場合がある。本研究ではより大域的な最適解を探索するため、進化型最適化手法である遺伝的アルゴリズム(GA)、粒子群最適化(PSO)、差分進化法(DE)を考えてトポロジー最適化とのハイブリッド最適化手法についての検討を行った。図7に2:1の非対称二分岐に対する最適設計例を示す。ここではもっとも収束の良かったPSOとトポロジー最適化のハイブリッド最適化法とPSO単体の最適化法における最小化すべき目的関数の収束の様子を示している。なおハイブリッド化におけるトポロジー最適化の計算時間の増加量はPSO単体の場合に比べて1反復当たり1.02倍であり、ほとんど無視できる。図より解の収束性が大幅に改善していることがわかる。最終的に得られた規格課出力は各ポートに0.613, 0.308であったが、この構造をトポロジー最適化によりさらに改良することもでき、その場合の出力はそれぞれ0.630, 0.312であり、設計領域サイズ4ミクロン×3ミクロンの中で非常に小さな非対称二分岐が設計されている。



目的関数の収束の比較



PSO とトポロジー最適化のハイブリッド法の結果



ハイブリッド法で得られた構造の改良結果

図 7 ハイブリッド最適化法による設計例

(4) その他

この他にも光導波路デバイスの最適設計に関して多くの検討を行い有益な知見を得ている。そのいくつかを以下に述べる。

設計により得られる構造が複雑化することへの対処の方法として、トポロジー最適化の反復改良ごとに構造平滑化フィルタを導入することで最終的に得られる構造から微細な構造をある程度取り除くことができることを示し、雑誌論文①などで報告している。

特に強導波路を用いた場合に局所解に陥りやすいことに対する対処法の一つとして、最適化の初期段階においては材料の屈折率差を意図的に小さくし、最適化の進行に合わせて本来の屈折率差に近づけていく方法についても検討し、局所解へ捕らわれることをある程度回避できることを示し、雑誌論文③などで報告している。

設計に用いる材料数がこれまで2種類に限定されていたが、3種類以上の材料を用いる場合の最適設計法についても検討を行い、雑誌論文⑦などで報告している。このことは3次元構造を2次元近似した場合に、導波路高さの違いを等価屈折率の違いとして考慮するときにも有用である。

3次元設計の必要性としては、2次元近似設計による結果を実際に3次元構造として特性評価した場合の得られる特性の違いについて議論し、特に強導波路においては3次元構造としての設計を行わなければ十分な特性が得られないことを示し、実際に3次元設計による結果を雑誌論文③などで報告している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

- ① H. Goto, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, A study on optimization of waveguide dispersion property using function expansion based topology optimization method, *IEICE Transaction on Electronics*, Vol. E97-C, No.6, accepted for publication, July 2014, 査読有,
- ② Z. Zhang, Y. Tsuji, and M. Eguchi, Design of polarization splitter with single-polarized elliptical-hole core circular-hole holey fibers, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 26, No. 6, pp. 541-543, March 2014, 査読有, DOI: 10.1109/LPT.2013.2296592
- ③ T. Yasui, Y. Tsuji, J. Sugisaka, and K. Hirayama, Design of three-dimensional optical circuit devices by using topology optimization method with function-expansion-based refractive index distribution, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 31, No. 23, pp. 3765 – 3770, Dec. 2013, 査読有, DOI: 10.1109/JLT.2013.2288107
- ④ M. Eguchi and Y. Tsuji, Influence of reflected radiation waves caused by large mode field and large refractive index mismatches on splice loss evaluation between elliptical-hole lattice core holey fibers and conventional fibers, *Journal of Optical Society of America B*, Vol. 30, No. 2, pp. 410–420, Feb. 2013, 査読有, DOI: 10.1364/JOSAB.30.000410
- ⑤ M. Eguchi and Y. Tsuji, Single-polarization elliptical-hole lattice core photonic-bandgap fiber, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 31, No. 1, pp. 177–182, Jan. 2013, 査読有, DOI: 10.1109/JLT.2012.2226867
- ⑥ 仲 祐輔, 平山浩一, 安井 崇, 佐藤慎悟, 辻 寧英, 山崎慎太郎, 西脇眞二, レベルセット法による導波管 H 面回路の導体形状最適設計, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J95-C, No. 7, pp. 139–143, July 2012, 査読有
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009470642>
- ⑦ K. Fujimoto, Y. Tsuji, K. Hirayama, T. Yasui, S. Sato, and R. Kijima, A study on topology optimization of optical circuits consisting of multi-materials, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 30, No. 13, pp. 2210–2215, July 2012, 査読有, DOI: 10.1109/JLT.2012.2195474
- ⑧ H. Gotoh, M. Koshiba, and Y. Tsuji, Finite-element time-domain beam propagation method with perfectly

matched layer for electron waveguide simulations, IEICE Electronics Express, Vol. 8, No. 16, pp. 1361–1366, Aug 2011, 査読有 DOI: 10.1587/elex.8.1361

- ⑨ 曾根宏靖, 原田康浩, 今井正明, 辻寧英, 中村真毅, 重水中テーパーファイバーからのスーパーコンティニウム光パルスのスペクトルと位相の数値解析: テーパーウェスト長による影響, 光学, Vol. 40, No. 8, pp. 439–447, Aug. 2011, 査読有, <http://osj-jsap.jp/publication/public/40-08-kenkyuronbun2.pdf>
- ⑩ K. Hirayama, Y. Tsuji, S. Yamasaki, and S. Nishiwaki, Design optimization of H-plane waveguide component by level set method, IEICE Transactions on Electronics, Vol.E94-C, No.5, pp.874–881, May 2011, 査読有, DOI: 10.1587/transele.E94.C.874

[学会発表] (計29件)

- ① 辻寧英, 加藤駿, 後藤裕之, 平山浩一, 安井崇, 有限要素法を用いた光デバイスのトポロジー最適設計, 電子情報通信学会総合大会, 2014年3月18-21日, 新潟市
- ② 野澤広大, 辻寧英, スラブ型フォトニック結晶の完全PBGに関する検討, 電子情報通信学会総合大会, 2014年3月18-21日, 新潟市
- ③ 平山浩一, 杉坂純一郎, 安井崇, 辻寧英, 自由空間法におけるNRW法と有限要素法による材料定数推定, 電子情報通信学会総合大会, 2014年3月18-21日, 新潟市
- ④ 後藤裕之, 辻寧英, 安井崇, 平山浩一, 低分散可変スローライトフォトニック結晶導波路のトポロジー最適設計, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2013年9月4-7日, 北見市
- ⑤ 加藤駿, 辻寧英, 安井崇, 平山浩一, スロット導波路光回路素子の関数展開法に基づくトポロジー最適設計, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2013年9月4-7日, 北見市
- ⑥ 張沢君, 加藤駿, 辻寧英, 安井崇, 平山浩一, 進化的アルゴリズムを用いた光回路デバイスの最適設計, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2013年9月4-7日, 北見市
- ⑦ 平山浩一, 安井崇, 杉坂純一郎, 辻寧英, フォトニック結晶入出力部最適化に関する一検”, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2013年9月4-7日, 北見市
- ⑧ 野澤広大, 後藤裕之, 辻寧英, 完全PBGを有するスラブ型フォトニック結晶に関する検討, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2013年9月4-7日, 北見市
- ⑨ 張沢君, 辻寧英, 江口真史, 楢岡空孔
- フォトニック結晶ファイバを用いた偏波分離素子のFSMによる設計, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2013年9月4-7日, 北見市
- ⑩ 加藤駿, 辻寧英, 安井崇, 平山浩一, 関数展開法に基づく3次元光導波路のトポロジー最適設計における関数系の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 2013年7月18-19日, 稚内市
- ⑪ 後藤裕之, 辻寧英, 安井崇, 平山浩一, トポロジー最適化を用いたハイブリッド遺伝的アルゴリズムによる分散特性最適化の検討, 電磁界理論研究会, 2013年7月18-19日, 稚内市
- ⑫ 張沢君, 辻寧英, 江口真史, 楢岡空孔, 楢岡空孔を用いた偏波分離素子の設計, 電子情報通信学会技術研究報告, 2013年7月18-19日, 稚内市
- ⑬ H. Goto, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, A Study on Function Expansion Based Topology Optimization Method for Dispersion Property, 2013 International symposium on Electromagnetic theory (EMTS2013), 2013年5月20-24日, 広島市
- ⑭ J. Tsutsumi, K. Hirayama, T. Yasui, and Y. Tsuji, Numerical Analysis of Conical Horn with Dielectric Lens in Free-Space Method, 2013 International symposium on Electromagnetic theory (EMTS2013), 2013年5月20-24日, 広島市
- ⑮ 後藤裕之, 辻寧英, 安井崇, 平山浩一, 遺伝的アルゴリズムに基づくトポロジー最適化による導波モード分散特性の最適化の検討, 電子情報通信学会総合大会, 2013年3月19-22日, 岐阜市
- ⑯ 加藤駿, 辻寧英, 安井崇, 平山浩一, 関数展開法に基づくトポロジー最適化における展開関数と構造単純化に関する検討, 電磁界理論研究会, 2012年11月15-17日, 阿蘇市
- ⑰ 後藤裕之, 辻寧英, 安井崇, 平山浩一, 関数展開法に基づくトポロジー最適化によるフォトニック結晶導波路デバイスの分散特性最適化に関する検討, 電磁界理論研究会, 2012年11月15-17日, 阿蘇市
- ⑱ 平山浩一, 安井崇, 辻寧英, 誘電体レンズの特性評価と設計に関する検討, 電磁界理論研究会, 2012年11月15-17日, 阿蘇市
- ⑲ 加藤駿, 辻寧英, 安井崇, 平山浩一, 関数展開法に基づくトポロジー最適化による波長分離デバイスの設計に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 2012年7月26-27日, 札幌市
- ⑳ 木島涼輔, 安井崇, 辻寧英, 平山浩一, 関数展開法に基づくトポロジー最適化を用いた3次元光導波路設計における初期

- 構造の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 2012年7月26-27日, 札幌市
- 21 後藤裕之, 辻 寧英, 安井 崇, 平山浩一, 関数展開法に基づくトポロジー最適化によるスローライトフォトニック結晶導波路の設計と構造単純化に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 2012年7月26-27日, 札幌市
 - 22 辻 寧英, 木島涼輔, 佐藤慎悟, 安井 崇, 平山浩一, “光回路デバイス最適設計のための関数展開法に基づくトポロジー最適化に関する検討”, 電子情報通信学会総合大会, 2012年3月20-23日, 岡山市
 - 23 後藤裕之, 辻 寧英, 平山浩一, “関数展開法に基づくトポロジー最適化による導波モード分散特性の最適化に関する検討”, 電子情報通信学会総合大会, 2012年3月20-23日, 岡山市
 - 24 江口真史, 辻 寧英, 単一偏波単一モード楕円格子コアフォトニックバンドギャップファイバの設計, 電子情報通信学会技術研究報告, 2011年11月17-18日, 松江市
 - 25 木島涼輔, 藤本幸太, 平山浩一, 辻 寧英, 佐藤慎悟, 3次元光導波路デバイスのトポロジー最適設計における初期条件の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 2011年7月21-22日, 北見市
 - 26 清水省吾, 瀬田純己, 平山浩一, 辻 寧英, 佐藤慎悟, 波面整合法を利用した3次元光導波路デバイスの最適設計の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 2011年7月21-22日, 北見市
 - 27 仲祐輔, 佐藤慎悟, 平山浩一, 辻 寧英, 山崎慎太郎, 西脇眞二, レベルセット法による導波管H面T分岐回路の導体形状最適設計の検討, 電磁界理論研究会, 2011年7月21-22日, 北見市
 - 28 瀬田純己, 辻 寧英, 平山浩一, 佐藤慎悟, 結合係数が連続的に変化する方向性結合型光導波路デバイスの最適設計の検討, 電磁界理論研究会, 2011年7月21-22日, 北見市
 - 29 藤本幸太, 平山浩一, 佐藤慎悟, 辻 寧英, 多媒質からなる光回路および非相反光回路に対するトポロジー最適設計の検討, 電磁界理論研究会, 2011年7月21-22日, 北見市

[その他]

ホームページ等

<http://www3.muroran-it.ac.jp/yt-lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 寧英 (Yasuhide Tsuji)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：70285518