

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06370

研究課題名(和文)生産性と光学特性に秀でたチューナブル波長選択フィルタの開発と赤外波長域への展開

研究課題名(英文)Development of tunable wavelength filter for NIR and IR

研究代表者

依田 秀彦(Yoda, Hidehiko)

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：30312862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：次世代光アクセス網の高速大容量技術方式 WDM-PON(NG-PON2)におけるキーデバイスとなるチューナブル波長選択フィルタ(光学薄膜を利用した温度制御型T0-BPF)の開発を行った。近い将来、赤外波長域0.8～14μmへの展開を視野に光学定数の評価を行った。成果は以下の6項目：(1)多層膜BPF作製時にTECファイバ型光学モニタ導入 (2)T0-BPFチップを光ファイバ実装&低消費電力化 (3)a-Si:H膜の低損失化 (4)T0-BPFの温度性能評価 (5)赤外波長域1.7～14μmにおける光学定数評価およびデータ公開 (6)近赤外波長域0.7～1.7μmにおける光学定数評価。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1)温度制御型チューナブル波長フィルタのNG-PON2への採用に向けて、作製技術の向上・光学特性の改善・ファイバ実装化を推し進めた。(2)50種類以上の光学材料(誘電体、半導体、金属、有機材料、カルコゲナイドガラス)の赤外波長域の光学定数評価を行い、データを蓄積した。測定データをWeb公開することで、将来、広範囲の赤外波長域を利用した新規のデバイス設計、材料開発を促すことにつながる。

研究成果の概要(英文)：In future optical access network based on WDM-PON, wavelength-tunable narrow bandpass filters (BPFs) are required for colorless optical network units. Tunable BPFs using a-Si:H/SiO<sub>x</sub> multilayer have simple structure, high productivity, narrow bandpass (0.8 nm), and wide tuning range (30 nm). The tunable BPF is based on thermo-optic effect in thin film of amorphous silicon. In fabrication, a-Si:H/SiO<sub>x</sub> multilayer was deposited using RF magnetron sputtering. The BPF chip size was 1.2x1.2 mm and 0.1 mm

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光波長フィルタ 光デバイス 赤外波長域

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) チューナブル波長選択フィルタ

2015年にIEEE/ITU-T次世代光アクセス網NG-PON2規格の標準化が完了した。今後の光アクセス網(=光ファイバ加入者系通信網)では、光ファイバ中には(0.4, 0.8 or 1.6nmの波長間隔で)4~数10もの波長多重化信号が伝搬することになる。同規格では、ユーザへの波長割当や波長数増加に対して柔軟に対応するため、ユーザ宅に設置されるONU(光回線終端装置)のカラーレス化(全波長対応)が仕様化されている。カラーレスONU中には小型で高信頼性のチューナブル波長選択フィルタが必須となる。チューナブル波長選択フィルタは、波長多重化信号の中から所望の波長を可変選択する光波制御素子であり、カラーレスONUを安価に実現するためのキーデバイスである。ONU用途のチューナブル波長選択フィルタには高生産性と高性能を併せもつことが要求される。だが、カラーレスONU用途にベストな波長フィルタの開発はまだ完了していない。

### (2) 赤外波長域(0.8~14 $\mu\text{m}$ )にわたる光学定数

光ファイバ通信網では赤外波長域の一部(1.26~1.36, 1.48~1.62 $\mu\text{m}$ )が使われる。一方、近い未来の車載ネットワーク(0.8~1.6 $\mu\text{m}$ )や赤外線カメラ(1~14 $\mu\text{m}$ )等の用途では、広範囲の赤外波長域(0.8~14 $\mu\text{m}$ )が利用される。将来さまざまな用途で、赤外波長域(の各波長)に対応するチューナブル波長フィルタが必要とされることが予想される。将来に向けて研究を展開するのに、0.8~14 $\mu\text{m}$ にわたる光学定数(複素屈折率 $n-jk$ )の高精度評価が出発点となる。

## 2. 研究の目的

### (1) 光学薄膜の熱光学効果を利用したチューナブル波長選択フィルタの継続開発

シリコン系薄膜(a-Si:H, a-Si:D, a-SiN<sub>x</sub>, a-SiO<sub>x</sub>)の熱光学効果を利用した温度制御型フィルタの開発であり、シンプルな構造(高生産性)と、温度制御による大きな波長チューニング特性を有する。申請者はフィルタチップ作製技術と性能改善を継続的に行っており、残る幾つかの課題を解決して、カラーレスONU用途(波長1.5~1.6 $\mu\text{m}$ )に十分な性能をもつフィルタを実現する。カラーレスONU用途に適することを総合的に実証する。

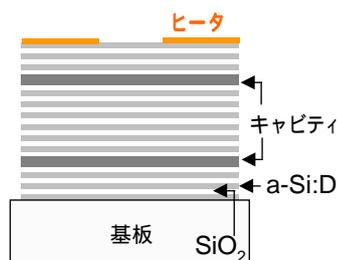


図1. 多キャビティ構造

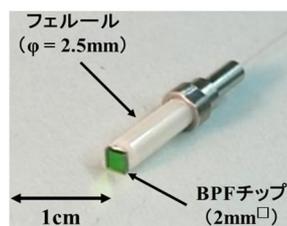


図2. TECファイバ集積BPF

#### 消費電力と応答速度の改善

- ・基板の一部を除去し極薄構造加工 消費電力を0.7W(現状)から0.2W以下。
- ・電力フィードバック制御と冷却機構導入 応答時間を1.5秒(現状)から0.5秒以下。

#### 成膜技術とスペクトル形状の改善

- ・成膜時の光学膜厚モニタ系を改善 光学モニタ変動を0.04%(現状)から0.01%以下。
- ・フィルタキャビティ数を増加 スペクトル形状ファクタを0.35(現状)から0.5以上。
- ・水素リッチa-Si:H新規成膜の試み 反射損失を20%(現状)から10%以下。

#### モジュール化

- ・現状のファイバ集積BPF(図2参照)に温度制御/冷却機構を追加&省スペース
- ・ONU用途に適することを総合的に実証

### (2) 赤外波長域(0.8~14 $\mu\text{m}$ )にわたる光学定数の高精度評価

様々な材料の赤外波長域での光学定数評価である。測定装置として、赤外分光エリプソ装置(2~30 $\mu\text{m}$ ;全国的にかなり希な装置)および近赤外分光光度計(0.3~2 $\mu\text{m}$ )を所有し、申請者は装置管理者として無機/有機/半導体材料の光学定数解析経験をもつ。この装置環境や経験を他に先駆けて活かせる絶好の研究となる。得られた光学定数分散データをWeb公開する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 温度制御型チューナブルフィルタ

消費電力の低減 (0.7W 0.2W 以下)

スパッタ装置を使い、石英基板上に ITiO 透明ヒータ膜と a-Si:D/a-SiNx (または) a-Si:D/a-SiOx 多層膜バンドパスフィルタ (2 キャビティ構造) を成膜する。成膜時に (現在導入を進めている) TEC ファイバ光学系を使用し、高精度な光学モニタ膜厚制御を行う。成膜後、ポストアニールして光学特性を安定化させる。ダイシングソーで 1.4mm チップ化 + 薄く光学研磨し、チップ体積を限界まで小さくする。断熱溝を形成したジルコニアフェルールに BPF チップを固定し、放熱抑制する。

多キャビティ化

優れた箱形スペクトル特性を目的として、チューナブル LD と光スペアナを同期させたスペクトル光学モニタを新たに導入する。3~5 の多キャビティ構造のチューナブルフィルタを作製する。また成膜時間が比較的長時間になるため、成膜シーケンスを (現在の手動から) 半自動化するためのプログラミングを行う。

応答速度の改善 (1.5 秒 0.5 秒以下)

フィルタチップの体積を限界まで小さくすることで、透明ヒータ膜からフィルタ膜への熱伝導が効率的になり、応答速度が向上する。さらに、ヒータ膜への電力印加法の改善 (2 ステップ印加)、冷却機構の搭載 (小型ファンおよびペルチエ素子) を行い、応答速度の更なる向上を試みる。

損失低減

Ar+H2 ガスの H2 比率、ガス流量等を振って成膜し、a-Si 膜の消費係数を実験的に評価することで、BPF の吸収損失を低減する。また光学モニタ系の精度向上によって不要な反射損失を低減する。

モジュール化

現状の TO-BPF チップ、30 μm TEC ファイル、フェルール、割スリーブに加えて、電流源、冷却機構、電力モタ回路、温度モタ回路を含めたモジュールを試作する。

#### (2) 赤外波長域にわたる光学定数の高精度評価

測定装置の改良

波長 0.8~2.0 μm の光学定数を測定評価するための近赤外分光光度計 (透過率、反射率、偏波の振幅比角 を測定可能) に、新たに位相差測定ユニット (偏波の楕円率角 を測定可能) を追加することによって、エリプソと同等の測定が可能となる。

高精度処理の検討

赤外分光エリプソ測定装置を使って薄膜の光学定数を高精度に求めるには、基板の裏面処理 (凸凹処理 or くさび加工) により裏面反射率を理想的に 0 にすること、基板の光学定数 (特に虚部) の分散を正確に求めること、が重要となる。また基板選択には、基板の屈折率が高いこと、基板の透過率が 0 でない (吸収が小さい) こと、薄膜との屈折率差が程々大きいこと、が必要条件となる。測定波長に応じて複数の基板を用意し、基板処理/選択について実験的に検討する。

基板材料、薄膜の測定評価

ノンドーパ Si 基板、石英基板、カルコゲナイド基板 (+ 薄膜) について、光学定数の評価を行う。

成膜装置の改良、水素リッチ a-Si:H 成膜

H リッチ a-Si:H 膜の成膜を試みるため、スパッタ成膜装置の一部改良を試みる。水素ガス導入系の追加、希釈用アルゴンガス系の追加。H2+Ar プラズマをチャンバ内部の局在させる仕切り追加、を行う。その上で、H リッチ a-Si:H 単層膜、さらに a-SiNx 膜との交互多層膜を成膜する。水素を扱うので危険でないよう十分成膜条件に注意を払う。

薄膜の成膜と測定評価

様々な薄膜材料 (Si 系、Ge 系、赤外透明導電膜) について、成膜と光学定数の解析評価を行う。

| 方式     | 1 年目  | 2 年目  | 3 年目                               |
|--------|---|---|------------------------------------|
| フィルタ開発 | 消費電力改善と成膜技術<br>省電力化<br>多キャビティ化                  | 応答速度と光学特性の改善<br>応答向上<br>反射損失低減                              | モジュール化<br>モジュール化<br>前年までの問題解決      |
| 光学定数評価 | 基板材料の評価<br>測定装置アップデート<br>高精度処理の検討<br>基板材料、一部薄膜も | 薄膜材料の成膜と評価<br>成膜装置の改良<br>水素リッチ a-Si:H 成膜<br>赤外透明導電膜 ITiO 成膜 | 成膜や評価の継続<br>再現性や信頼性向上<br>前年までの問題解決 |

#### 4. 研究成果

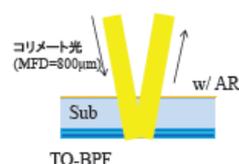
### 温度制御型チューナブル波長選択フィルタ(TO-BPF)の性能向上とモジュール化

#### (1)多層膜 BPF の作製技術 (H29, R3)

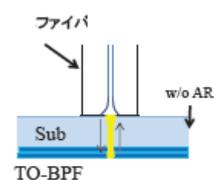
BPF 多層膜成膜時の光学モニタ法について、次の改良を行った：ビーム径の小さなモニタ光の照射，厚い基板の採用．この改善によりモニタ反射率の挙動を理論値に近づけることができ，半値全幅 0.6nm の TO-BPF (シングルキャビティ型) を作製できた．この改良により，今後マルチキャビティ型 BPF の開発につながる．

【外部発表：戸賀沢(2018.3)】

多層膜 TO-BPF 成膜時の光学膜厚モニタ系を（従来の1系統から）2系統に増やし，多キャビティ成膜時に従来より多くの情報を得る目的で，ツイン TEC ファイバ(2本の TEC ファイバを1穴フェルールに固定した部品)を試作し，その動作確認を行った．穴直径 250  $\mu\text{m}$  強のフェルールに，ビーム直径 30  $\mu\text{m}$  の TEC ファイバ 2本を接着固定し，フェルール先端を光学研磨した．さらに広帯域光源と光スเปアナを用い，石英基板にフェルールを接触させたとき，2系統別々に反射スペクトル測定した．その結果2系統において従来と同様の反射スペクトルを得るには，研磨方法や接触方法に従来と異なる工夫が必要である実験的知見を得た．



(a)コリメート光入射



(b)ファイバ光入射

図3 モニタ光入射方法

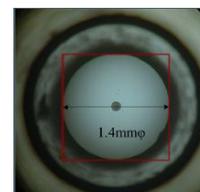
#### (2)実装&低消費電力化 (H29, H30, R1)

TO-BPF チップを光ファイバフェルールに実装した際の消費電力を低減すべく，次の改良を行ったが，消費電力は低減しなかった：チップの更なる薄型化(0.2 0.1mmt)，チップへの断熱溝加工．低減しなかった原因を隻眼線サーモカメラで観察し，チップからフェルールへの熱伝導抑制が十分でないことがわかった．

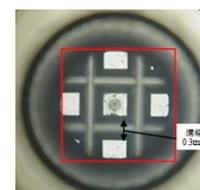
TO-BPF チップを光ファイバフェルールにコンパクトな実装化および断熱による低消費電力化に取り組んだ．フェルール端に断熱溝を設けたファイバ実装 TO-BPF を提案し，そのための作製プロセスを検討した．フェルールと BPF チップとの接触面積比 30%の場合，消費電力効率 35mW/nm の測定結果を得，断熱溝の有効性を実証した．

TO-BPF チップを光ファイバフェルールにコンパクトな実装化，さらなる断熱効率の改善，および応答評価に取り組んだ．細径リード線の採用により割スリーブ内にコンパクトに収納した．フェルール端に断熱溝を広げることでフェルールと BPF チップとの接触面積比 15%(前年 30%)にして消費電力効率 30mW/nm (同 35mW/nm)に改善した．断熱溝の深さが応答速度の向上につながる結果を得た．

【外部発表：須藤(2019.3)】



(a)溝加工前



(b)断熱溝加工後

図4 フェルール端面加工

#### (3)低損失化 (R2)

Si/SiO<sub>x</sub> TO-BPF の低損失化，および，マルチキャビティ型 TO-BPF の作製，に取り組んだ．スペーサ層材料(a-Si:H)の成膜条件を変更して消費係数を 1桁低減させた結果，TO-BPF の光吸収率を（従来 20%から）2%程度以下への大幅な抑制を達成した．ダブルキャビティ型 TO-BPF を作製し，作製技術とモニタ技術を改良し，従来より優れた光学特性を改善できた（最大透過率 70%，半値全幅 1.6nm，Shape Factor 0.75）．

【外部発表：紺野(2021.3)】

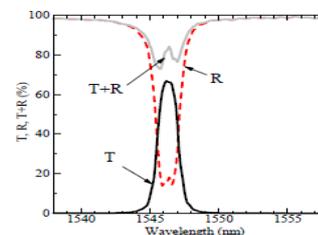


図5 BPF 透過スペクトル

#### (4)温度性能評価 (R1)

測定に用いる光ファイバとコネクタの耐熱性を改善し，温度室温～300における温度依存性の評価系を構築した．中心波長が温度に対して2次関数的に変化することを明らかにした．

【外部発表：紺野(2020.3)】

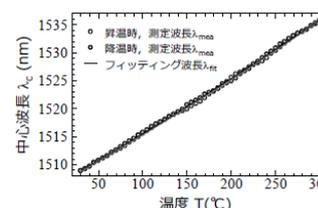


図6 BPF 中心波長の温度特性

## 赤外波長域(0.8~14 μm)にわたる光学定数の高精度評価

### (5)赤外波長域(1.7~14 μm)における光学定数

赤外分光エリプソ測定 (R1, R2, R3)

波長 1.7~14 μm における光学定数を評価するため,赤外分光エリプソメータを用いて各種材料の測定&解析を行った:

- ・誘電体や半導体 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> BK7 CaF<sub>2</sub> CeYO DLC GaAs Ge Glass InSb InAsSb ITO MgF<sub>2</sub> Si SiGe Silica SiN<sub>x</sub> SiO<sub>2</sub> SiO<sub>x</sub> TiO<sub>2</sub> TiO<sub>x</sub> YF<sub>3</sub> ZnO ZnS ZnSe ZrO<sub>2</sub>)
- ・金属 (Ag Al Au Cr Mo NiCr Pt PVDF SUS Ti TiN W)
- ・有機材料 (BM EVA PC PE PMMA PP PS PVA PVB)
- ・カルコゲナイドガラス多種

データ公開 (R2)

測定&解析によって得られた光学定数を WEB 公開するため,研究室ホームページを一新し,データ公開を開始した.

【URL : <http://www.ee.utsunomiya-u.ac.jp/yoda-lab/wp/archives/>】



### (6) 近赤外波長域(0.7~1.7 μm)における光学定数

近赤外分光光度測定 (H29, H30, R1)

近赤外分光光度計の反射率と透過率の測定結果を用い,逐次分析法により基板試料や薄膜試料の光学定数(n,k)を解析した.吸収が小さな波長領域であれば(n,k)を算出できるが,吸収が大きな場合には計算値が発散してしまう状況である.

翌年度に解析の改善を進め,水素/重水素リッチ a-Si をガス流量比 5-10%で成膜し,波長 0.9 μm 付近の光学定数を算出した.さらに本解析手法を CNF 厚膜(膜厚 30 μm)へ適用した.

【外部発表 : I. Niskanen(2022.5)】

分光光度計を利用したエリプソ測定 (H29, R3)

近赤外分光光度計を活用した分光エリプソの構築を試みた.分光光度計に波長板と回転検光子を組み込んでエリプソトリーの開発を試みた.分光光度計の入射ビームは角度拡がりをもつため,偏光状態の誤差(つまりエリプソパラメータの誤差)が大きいことが分かった.

翌年度以降,入射光が円形かつ平行ビームとなるように補正し,さらに偏光素子を導入して透過光や反射光の偏光状態を(可視光波長と近赤外波長のそれぞれで)測定した.実験の結果,分光光度計では近赤外波長域(NIR)の入射光強度が可視光波長域のそれより3桁低いことがエリプソ出力パラメータの大きな誤差につながる事が判明した.よって分光光度計の NIR 入射光強度を増やす工夫さえできれば,分光エリプソへの適用可能性を見込めると考える.

ファイバ光学系によるエリプソ測定 (H30, R1)

波長 1.1~1.65 μm の光学定数を測定評価するのに,広帯域光源と光スペアナ(+光ファイバ,アクロマティックレンズおよび 1/4 波長板,回転検光子)を用い,角度拡がりの小さなコリメータビームによるエリプソメトリを開発を進めた.

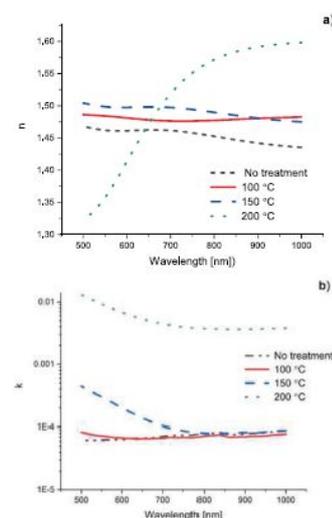


図 6 CNF 厚膜の屈折率分散

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>紺野大志, 依田秀彦                 |
| 2. 発表標題<br>光通信用T0チューナブルフィルタの低損失化      |
| 3. 学会等名<br>第11回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会 |
| 4. 発表年<br>2021年                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>大谷毅, 依田秀彦                           |
| 2. 発表標題<br>HC-PECVD成膜されたSiO <sub>2</sub> 薄膜の特性 |
| 3. 学会等名<br>応用物理学関係連合講演会                        |
| 4. 発表年<br>2021年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>下田優太, 松井裕章, 依田秀彦, 山原弘靖, J.K. クラーク, J.J. ドロネー, 寺村裕治 |
| 2. 発表標題<br>バイオセンシングに向けた赤外プラズモン・フォノンカップリング制御                   |
| 3. 学会等名<br>応用物理学関係連合講演会                                       |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐々木発輝, 依田秀彦, 大谷毅                           |
| 2. 発表標題<br>Si細線用ダウンテーパー型スポットサイズ変換器に形成したリッジ導波路部の光学特性評価 |
| 3. 学会等名<br>第11回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会                 |
| 4. 発表年<br>2021年                                       |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>紺野大志, 須藤航陽, 依田秀彦           |
| 2. 発表標題<br>T0チューナブルフィルタの光学特性の温度依存性測定  |
| 3. 学会等名<br>第10回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会 |
| 4. 発表年<br>2020年                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>佐々木発輝, 鳴瀬皓之, 依田秀彦, 大谷毅, 田中一郎                |
| 2. 発表標題<br>DCパルススパッタによるa-SiO <sub>x</sub> Ny成膜とその屈折率制御 |
| 3. 学会等名<br>第10回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会                  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>笠井敦司, 大町将央, 依田秀彦            |
| 2. 発表標題<br>ステップインデックス型ファイバ先端への穴形成と形状制御 |
| 3. 学会等名<br>第10回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会  |
| 4. 発表年<br>2020年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>磯村拓海, 福島達也, 小柴康子, 堀家匠平, 依田秀彦, 石田 謙司 |
| 2. 発表標題<br>誘電体多層膜構造をもつ有機焦電型赤外線センサの電圧感度波長依存性    |
| 3. 学会等名<br>応用物理学関係連合講演会                        |
| 4. 発表年<br>2020年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>下田優太, 松井裕章, 山原弘靖, 依田秀彦, J. K. Clark, J. J. Delaunary, 田畑仁 |
| 2. 発表標題<br>バイオセンシングプラットフォームに向けた酸化物半導体の赤外表面プラズモン制御                    |
| 3. 学会等名<br>応用物理学関係連合講演会  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>須藤航陽, 戸賀沢舟, 依田秀彦                   |
| 2. 発表標題<br>光通信用TO-BPFチップの光ファイバ実装方法と省電力化に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>第9回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会          |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>漆原陸, 大谷毅, 依田秀彦             |
| 2. 発表標題<br>反応性スパッタ法による膜質制御と光学素子への応用   |
| 3. 学会等名<br>大学コンソーシアムとちぎ第15回学生&企業研究発表会 |
| 4. 発表年<br>2018年                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>鳴瀬皓之, 大谷毅, 依田秀彦                   |
| 2. 発表標題<br>多層膜と微細周期パターンによる干渉機能を用いた大面積発色素子の試作 |
| 3. 学会等名<br>大学コンソーシアムとちぎ第15回学生&企業研究発表会        |
| 4. 発表年<br>2018年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>鳴瀬皓之, 赤沼啓伍, 依田秀彦                           |
| 2. 発表標題<br>Si細線導波路用ダウンテーパー型スポットサイズ変換器作製のためのリッジ導波路部の形成 |
| 3. 学会等名<br>第9回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会                  |
| 4. 発表年<br>2019年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>戸賀沢舟, 北川大河, 依田秀彦                |
| 2. 発表標題<br>光通信用T0チューナブル波長フィルタの作製と光ファイバへの実装 |
| 3. 学会等名<br>第8回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会       |
| 4. 発表年<br>2018年                            |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>漆原 陸, 小池俊輔, 依田秀彦                |
| 2. 発表標題<br>耐熱性多層膜ミラーの作製とE0チューナブル波長フィルタへの適用 |
| 3. 学会等名<br>第8回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会       |
| 4. 発表年<br>2018年                            |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>赤沼 啓伍, 高野周作, 依田秀彦                         |
| 2. 発表標題<br>Si細線導波路用ダウンテーパー型スポットサイズ変換器作製のための上部クラッド再形成 |
| 3. 学会等名<br>第8回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                                      |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

「光学定数データ」公開  
<http://www.ee.utsunomiya-u.ac.jp/yoda-lab/wp/archives/>

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|