

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560385

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チップの開発

研究課題名(英文)Development of tunable wavelength filter chip with remarkable productivity and optical properties

研究代表者

依田 秀彦(Yoda, Hidehiko)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30312862

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,100,000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におけるキーデバイス、チューナブル波長選択フィルタの開発を行った。光学薄膜を利用した2種類のフィルタ(温度制御型TO-BPF、電圧制御型EO-BPF)の作製技術とデバイス性能向上を進め、得られた成果は以下の9項目: a-Si:D/SiO_x TO-BPFによる生産性改善 TO-BPFの耐熱性改善 NIR波長域用ITiO透明ヒータ膜の実証 TO-BPFの小型化/薄型化による省電力化 省スペースTO-BPFモジュール試作; EO-BPF用PLZT用シード層兼透明電極の開発 EO-BPF構成要素の検討 1キャビティ型EO-BPFの試作。

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:D/SiO_x 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:D/SiO_x multilayer was deposited using RF magnetron sputtering. A heating layer of ITiO film was formed on the multilayer in advance. The BPF chip size was 2x2 mm and 0.05 mm. When current is applied to the heater layer, both temperature and selective wavelength of the BPF increase. We measured the center wavelength of the BPF chip when the power consumption at the heating layer was varied. The power of 0.3 W was used for the wavelength shift of +20 nm. It is noteworthy that the power required for the wavelength shift of +30 nm can be reduced to 0.45 W.

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 透明ヒータ膜

1. 研究開始当初の背景

近い将来光ファイバ加入者系通信網では、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) にカラーレス化 (全波長対応) が強く要求される。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 を実現するためのキーデバイスとなる。ONU 用途のチューナブル波長選択フィルタには高生産性 (つまり安価) と高性能を併せもつことが要求される。しかし高生産性と高性能を同時には満足するような、カラーレス ONU 用途に適するフィルタは現在まで存在しない。

2. 研究の目的

本研究では、カラーレス ONU 用途のチューナブル波長選択フィルタとして、光学薄膜を利用した 2 種類のフィルタ (温度制御型、電圧制御型) の開発を目指す。

(1) 温度制御型の目標 (3 点):

これまで継続的に開発しており、残された以下の課題を解決して高性能なフィルタの実現を目指す。

消費電力の低減, 応答速度の改善 (0.2W 以下, 1 秒以下)

成膜技術の向上, 多キャビティ化によるスペクトル形状の改善, 反射損失の低減 (光学モニタ変動 0.01% 以下, フィルタキャビティ数 3~4, スペクトル形状ファクタ 0.5 以上, 損失 15% 以下)

モジュール試作 (フィルタチップ, ファイバコリメータ, 冷却機構, 電力モニタ回路), 総合的な性能評価

(2) 電圧制御型の目標 (2 点):

前者で培った作製技術をベースに, 新規に作製を試みる。

作製技術の開発 (プロトタイプ試作, 狭帯域化 1nm 以下, 2 キャビティ構造)

フィルタ性能の実証 (波長可変範囲 20nm 以上, 消費電力 0.1W 以下, 応答時間 1 秒以下)

3. 研究の方法

2 種類のフィルタ (温度制御型, 電圧制御型) の開発を, 年度別に以下のように進める。

(1) 温度制御型の方法

(平成 23 年度)

透明ヒータ膜付き 1 キャビティ多層膜フィルタを作製し, 1.4~3mm²チップ化する。省電力化のため, フィルタ付き石英ガラス基板の局部薄型加工, 深穴底面の光学研磨, を行う。

応答向上のため, 2 ステップ電力印加とフィードバック安定制御, 冷却機構の搭載 (小型ファンとペルチエ素子)。

(平成 24 年度)

VB 制御プログラムを改良し, 成膜シーケンスと膜厚制御判断を半自動化する。

in-situ 光計測の精度と安定性を向上させるため, 光学系分岐比安定性 (S/N 30→40dB), 多波長/スペクトル波長ピークモニタ光学系の導入と膜厚制御判断の構築。

2~3 キャビティ多層膜フィルタを試作。面内温度分布不均一を解消するため, 熱伝導解析, 透明ヒータ膜材料の再検討, ヒータ膜パターン最適化。

材料吸収を減らすため, ヒータ膜の消費係数と膜厚を最適化する, 成膜に最高純度グレードガスを使用する。

(平成 25 年度)

前年までの問題解決

フィルタチップ, ファイバコリメータ, 冷却機構, 電力モニタ回路, 温度モニタ回路を組み込んだモジュールを試作する。

カラーレス ONU 用途に適することを総合的に実証する。(消費電力, 応答時間, スペクトル形状ファクタ, 損失)

(2) 電圧制御型の方法

(平成 23 年度)

強誘電体薄膜 (PLZT や BST) の形成を, スピンコート法 + ポストアニール, スパッタ + 高温基板加熱, で行う。結晶性と EO 効果を得るため, 最適な基板, シード層材料, 電極材料, アニール温度, フィルタ構造, 作製プロセスを実験的に検討する。

(平成 24 年度)

アニール各温度における強誘電体薄膜および Si 膜の光学特性と耐熱性を評価する。1 キャビティ型フィルタを試作する。光学設計仕様はゆめに設定する。

(平成 25 年度)

前年までの問題解決

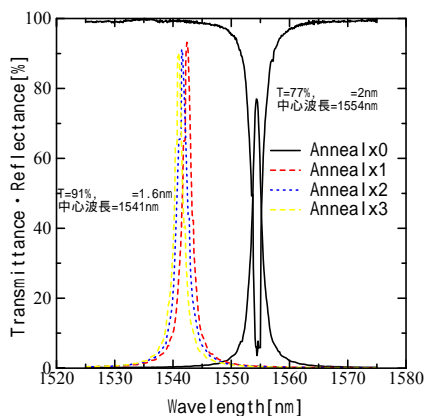
チューナブルフィルタ性能を実証する。(消費電力, 応答時間, 波長可変範囲, 狭帯域, 多キャビティ構造, 損失)

4. 研究成果

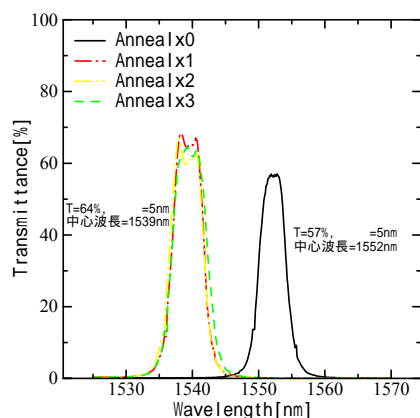
(1) a-Si:D/SiO_x TO-BPF による生産性改善

RF マグネトロンスパッタ装置を用いて, SiO_x の屈折率と成膜レートの条件出し実験を行い, SiO_x の屈折率は 1.87~2.8, 光学膜厚レートは 0.43~0.53nm/分を得た。光学膜厚レートの x 依存性は小さいため, 最も低屈折率となる SiO_x (屈折率 $n_L = 1.87$) を採用した。a-Si:D/SiO_x TO-BPF を作製した (図 1)。フィルタ成膜時間は, シングルキャビティ構造で

2 時間 40 分(従来の a-Si:D/SiO₂ フィルタでは 7 時間 30 分), ダブルキャビティ構造で 5 時間 30 分(同 15 時間 40 分)となった .SiO_x を採用したことでフィルタ成膜時間を従来比 1/3 に短縮化でき, フィルタ生産性が大きく向上した. さらに多層膜成膜中のモニタ反射率の S/N が良くなり, 多層膜フィルタ各層の作製精度が向上した.



(a) シングルキャビティ型



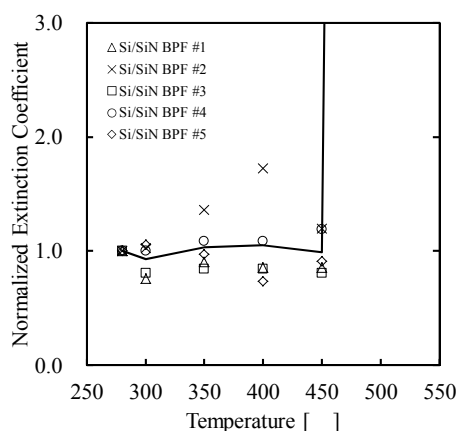
(b) ダブルキャビティ型

図 1 作製した TO-BPF の透過スペクトル

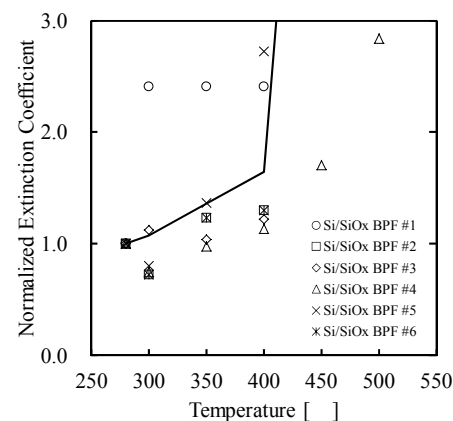
(2) a-Si:D/SiN_x TO-BPF による耐熱性改善

a-Si:D/SiN_x TO-BPF と a-Si:D/SiO_x TO-BPF を作製し, 作製後ポストアニールを施す. 更に真空電気炉にて高温熱処理を施した後, 室温に戻して分光測定を行った. 分光測定から TO-BPF のスペーサ層の消衰係数を算出した.

各 TO-BPF 消衰係数の熱処理温度依存性の測定結果を図 2 に示す. 各チップ試料のポストアニール後の消衰係数 κ_0 を基準として, 高温熱処理後の消衰係数 κ を規格化して評価した (κ/κ_0). a-Si:D/SiN_x TO-BPF では, 熱処理温度 450 まで消衰係数は変化せず, 500 で膜の劣化が発生した. 一方, a-Si:D/SiO_x TO-BPF では, 熱処理温度 400 まで少しずつ消衰係数が増加し, 450 で膜の劣化が発生した. SiN_x を用いることで, 高温時 450 まで吸収率増加を抑えられることを実証した.



(a) a-Si:D/SiN_x TO-BPF



(b) a-Si:D/SiO_x TO-BPF

図 2 TO-BPF 消衰係数の熱処理温度依存性

(3) NIR 波長域 TO-BPF 用透明ヒータ膜材料

近赤外(NIR)波長域における透明ヒータ膜の候補として 3 種類 (ITO, ITiO, pc-Si:B) の材料について検討した. ITiO (In₂O₃:TiO₂ 酸化インジウムチタン) は, ITO の SnO₂ の代わりに Ti を添加した材料である. 高周波マグネトロンスパッタ装置に ITiO ターゲットと Ar+O₂ ガスを用い, O₂ 流量割合 0%~7% の間で変化させて石英基板上に ITiO 薄膜を成膜した. 図 3 の分光特性からわかるように, ITiO 膜 (膜厚 d=300nm, $\rho = 1.15 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$) の NIR 波長域における吸収率は, ITO 膜 (膜厚 d=300nm, $\rho = 1.17 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$) のそれよりずっと小さい.

透明ヒータ膜の性能目標値として, 波長 1.55 μm の光に対する吸収率が 3% 以下であること, 体積抵抗率 ρ が $1 \times 10^{-3} \leq \rho \leq 5 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ であり繰り返し再現性があることと決めて, 各透明ヒータ膜候補の吸収率および体積抵抗率を測定評価した. 結果を図 4 に示す. この結果から

- ・ITiO 膜成膜時の酸素流量割合が増加すると光吸収率は減少し, 体積抵抗率は増加する.
- ・ITiO 膜厚が増加すると, 体積抵抗率が増加する.

がわかった. 以上から, 酸素流量割合を 2~2.5%, ITiO 膜厚を 40~300nm とすることで,

吸収率が3%未満で、体積抵抗率が $10^{-2} \cdot \text{cm}$ 以下の ITiO 透明ヒータ膜を作製可能である。NIR 波長域における透明ヒータ膜として ITiO が適切であることを見いだした。

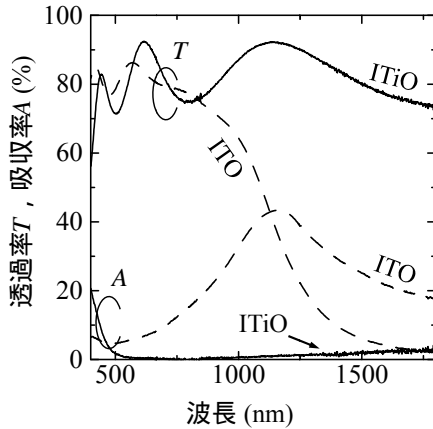


図3 ITO と ITiO の分光特性

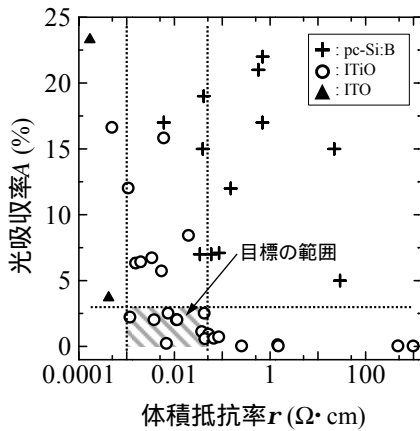


図4 光吸収率@1.55μm と体積抵抗率

(4) TO-BPF の小型化/薄型化による省電力化
ITiO 透明ヒータ膜付 a-Si:D/SiN_x TO-BPF チップを小型化(2mm²)・薄型化(0.05mm¹)したチップ試料を作製および加工した。ITiO 透明ヒータ膜に電流を流して発熱させ、TO-BPF チップの温度を変えたときの透過スペクトルの中心波長を測定をした。ヒータ膜の消費電力に対して中心波長変化量の測定結果を図5に示す。チップ試料を小型化・薄型化するにつれて、中心波長を1nm 移動させるのに必要な消費電力が少なくなる。チップ試料#1でもっとも消費電力効率がよい結果を得た(15mW/nm = 0.3W / 20nm)。

(5) 省スペース TO-BPF モジュール試作
ファイバコリメータ(市販品)と TO-BPF チップを組み合わせ、省スペース(5cm 長×2cm 幅)モジュールを試作した。V 溝加工アルミ板上に2つのコリメータを対向させて配置し(光軸ずれ 0.2mm, 結合効率 12%), さらに光軸調整用に平行平板を傾けて挿入することで、結合効率を86%に改善した。

(6) EO-BPF 用 PLZT 用シード層 兼 透明電極

C 面サファイア基板上に多層膜ミラー(6 ペア; 膜厚 2800 nm) \ ITiO 膜(膜厚 400 nm) \ PLZT 膜(膜厚 300 nm) を順次形成し, ITiO 膜と PLZT 膜の結晶性を評価した。結晶性評価には、薄膜用 X 線回折装置(XRD: X-Ray Diffraction)を利用した。図6に ITiO 膜, ITiO \ PLZT 膜の XRD 測定結果を示す。ITiO 膜は複数の結晶配向を有し、中でも(222)面(2θ=30.7°)が支配的な結果となった。ITiO 成膜時には基板温度未制御であり、成膜時の温度上昇は80 程度以下だが、ITiO 膜が結晶性(222)面を有することがわかった。

さらに PLZT 膜も複数の結晶配向を有し、中でも PLZT(110)面(2θ=31.15°)が支配的な結果となった。PLZT と ITiO の格子定数は大きく異なる(表1)が、PLZT(110)面が ITiO(222)面によって形成されたものとする。

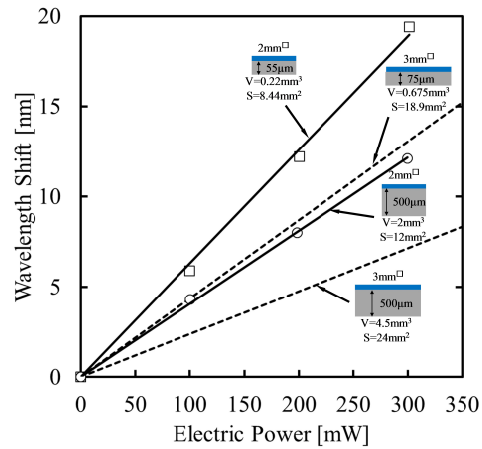


図5 消費電力特性

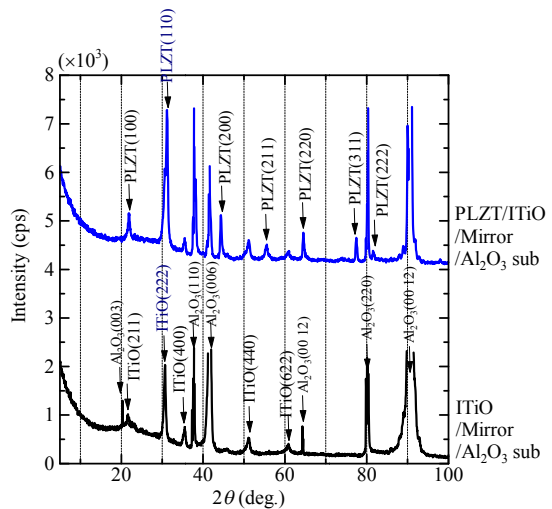


図6 PLZT の XRD 測定結果

(7) EO-BPF 構成要素の検討

PLZT 膜をペロブスカイト構造の結晶化する上で、数秒間に 600 以上に急昇温させる高温高速熱処理(Rapid Thermal Annealing: RTA)を施す。基板の線膨張係数が PLZT の

それと一致していないと，RTA 処理後 PLZT 膜にひび割れが生じる．透明性，線膨張係数，高温耐熱性の観点からサファイア基板を選択採用した．

ミラー層には，高反射率，低損失，高温耐熱性が求められる．低損失の高反射ミラーは誘電体交互多層膜によって実現できる．さらに 600 超の高温でも損失が増加しないように誘電体材料を選ぶ．窒化珪素 SiN_x / 二酸化珪素 SiO_2 が 600 超の高温耐熱性を有することを実験的に確かめ，これらを高 / 低屈折率層に用いた．

(8) 1 キャビティ型 EO-BPF の試作

PLZT と誘電体交互多層膜ミラーを用いて 1 キャビティ型 EO-BPF を試作した．図 7 に試作したフィルタ構造を示す．基板側から順に， $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 多層膜 (下部ミラー層) → ITiO (下部電極兼シード層) → PLZT (スペーサ層) → $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 多層膜 (上部ミラー層) → ITiO (上部電極層)，を形成した．電気及光学特性の評価系を構築中であり，後続の科研費 (C) (H26 ~ 28 年度) にて評価を行う．

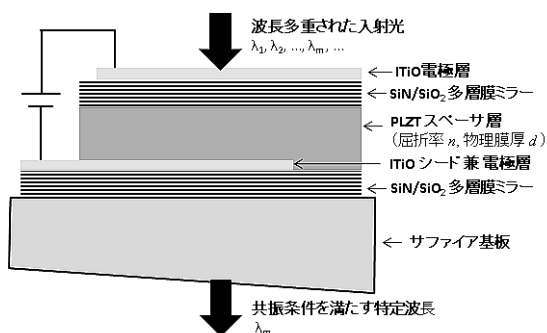


図 7 EO チューナブル波長フィルタの構造

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

K. Shiraishi, H. Yoda, Y. Kogami, and C. S. Tsai, "High Focusing Power Lensed Fibers Employing Graded-Index Fiber With Eigen-Beam Diameter," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 23, no. 19, pp. 1376-1378, Oct. 2011; 査読有,

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5940993&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F68%2F4581641%2F05940993.pdf%3Farnumber%3D5940993>.

K. Shiraishi, H. Yoda and Chen S. Tsai, "A two-port polarization-insensitive coupler module between single-mode fiber and silicon-wire waveguide," Optics Express, vol. 20, no 22, pp. 24370-24375, Oct. 2012; 査読有,

<https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-20-22-24370>.

K. Shiraishi and H. Yoda, "Infrared polarizer employing multiple metal-film subwavelength gratings," Optics Express, vol. 21, Iss. 12, pp. 13998-14007, June, 2013; 査読有,

<https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-21-12-13998>.

〔学会発表〕 (計 13 件)

H. Yoda, T. Tashiro, K. Shiraishi, and C. S. Tsai, "Response Evaluation of Tunable Optical Bandpass Filter Using a-Si:D/SiO2 Multilayer," in Proc. the Asia-Pacific Interdisciplinary Research Conference 2011 (AP-IRC 2011), Toyohashi, Japan, Nov. 17-18, 2011, paper 18PP-71 (発表場所: 豊橋技術科学大, 愛知県豊橋市).

小檜山知弘, 依田秀彦, "TO チューナブル波長フィルタ用透明ヒータ膜の作製と評価," 第 3 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-12-11, 2013 年 2 月 28 日 (発表場所: 宇都宮大学工学部, 栃木県宇都宮市).

水沼秀聡, 依田秀彦, "TO チューナブル波長フィルタ省電力化のための局部薄型加工," 第 3 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-12-60, 2013 年 3 月 1 日 (発表場所: 宇都宮大学工学部, 栃木県宇都宮市).

サナテム ウォンビライ, 依田秀彦, "Si/SiOx 多層膜フィルタの作製と消費係数評価," 第 3 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-12-62, 2013 年 3 月 1 日 (発表場所: 宇都宮大学工学部, 栃木県宇都宮市).

佐藤慶, 豊田篤志, 依田秀彦, "EO チューナブル波長フィルタ用 PLZT 薄膜の作製," 第 3 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-12-12, 2013 年 2 月 28 日 (発表場所: 宇都宮大学工学部, 栃木県宇都宮市).

飯富真, 依田秀彦, "EO チューナブル波長フィルタ用 PLZT 薄膜の形成条件," 第 3 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-12-10, 2013 年 2 月 28 日 (発表場所: 宇都宮大学工学部, 栃木県宇都宮市).

川崎将人, 依田秀彦, "Si/SiN 多層膜フィルタの作製と評価," 第 3 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-12-61, 2013 年 3 月 1 日 (発表場所: 宇都宮大学工学部, 栃木県宇都宮市).

小檜山知弘, 依田秀彦, "温度制御型波長選択フィルタ用透明ヒータ膜の作製," 第 4 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-14-106, 2014 年 3 月 (発表場所: 群馬大学工学部, 群馬県桐生市).

サナテムウォンビライ, 依田秀彦, "マルチキャビティ型 Si/SiOx 多層膜フィルタの作製," 第 4 回電気学会東京支部栃木・群馬

支所合同研究発表会, ETT-14-20, 2014年3月(発表場所:群馬大学工学部,群馬県桐生市).

豊田篤志, 依田秀彦, "PLZTを用いたEOチューナブル波長フィルタの作製要素技術の開発," 第4回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-14-18, 2014年3月(発表場所:群馬大学工学部,群馬県桐生市).

水沼秀聡, 依田秀彦, "温度制御型チューナブル波長フィルタチップの局所加工による省電力化," 第4回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-14-19, 2014年3月(発表場所:群馬大学工学部,群馬県桐生市).

飯富真, 依田秀彦, "EOチューナブル波長フィルタ用PLZT薄膜の電気及光学特性評価に関する研究," 第5回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-15-62, 2015年3月(発表場所:宇都宮大学工学部,栃木県宇都宮市).

田島正彦, 依田秀彦, "Si/SiNチューナブル波長フィルタの作製と評価に関する研究," 第5回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-15-74, 2015年3月(発表場所:宇都宮大学工学部,栃木県宇都宮市).

[図書](計1件)

依田秀彦(分担執筆), "第8章第27節 光学多層膜を用いた波長可変フィルタの設計と応用," pp. 793-800, 「光学薄膜の最適設計・成膜技術と膜厚・膜質・光学特性の制御」(金原粲 監修, 技術情報協会), 2013年6月発刊.

6. 研究組織

(1)研究代表者

依田 秀彦 (YODA, Hidehiko)
宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30312862