

酸化スズ薄膜を利用した光波長検出デバイスの開発

Development of Wavelength Detection Device using Tin Dioxide Thin Film



米谷 玲皇 (Reo Kometani, Dr. Sci)

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻 准教授

(Associate Professor, Department of Human and Engineered Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo)

応用物理学会 日本機械学会 精密工学会

受賞: 文部科学大臣表彰 若手科学者賞 (2020年), 日本機械学会 マイクロ・ナノ工学部門 部門一般表彰 貢献表彰 (2019年), 日本機械学会 マイクロ・ナノ工学部門 優秀講演論文表彰 (2019年), 応用物理学会 2016年春季学術講演会 Poster Award (2016年), 他

著書: 電子・イオンビームハンドブック第4版, 第II章, 第14節, 14.1, “液体金属 FIB-3次元ナノ造形技術, デバイス研究への利用”, 日本学術振興会 第132委員会 編 (2021年), ナノ・マイクロスケール機械工学, 第3章 3.2.3節, 第4章 4.1.3節, 及び4.2.3節, 東京大学出版会 (2014年), 他

研究専門分野: 荷電粒子ビーム工学, ナノメカニクス

あらまし

本研究では、光通信分野や物質分析分野、センサ分野など様々な光応用分野の高度化に貢献することを狙い、酸化スズ (SnO_2) 薄膜を利用した光波長検出デバイスに関する研究を行った。 SnO_2 薄膜の吸光特性を利用し、 SnO_2 薄膜へ光を照射した際に、光波長に依存し生じる熱による電気的性質の変化を読み取り、照射された光の波長のズレを検出するというのが、本研究で提案するデバイスの光波長の検出原理である。

顕微ラマン分光法によりデバイスのベースとなる SnO_2 薄膜の物性評価を行うとともに、電子ビームリソグラフィ等を活用しデバイスを作製した。光波長検出特性の評価を通して、光波長検出デバイスとして機能することを実証するとともに、作製したデバイスが、1.7 nm の波長計測分解能を有することを確認した。シンプルな作製プロセスで実現可能なデバイスであり、その高性能化、機能化を推進することにより、様々な分野での応用が期待される。

1. 研究の目的

本研究の目的は、光通信分野や物質分析分野などの光を応用する様々な分野の高度化に資する光波長検出デバイスを創出することである。本研究では、極めてシンプルなプロセスで作製可能な光波長検出デバイスの実現を狙い、 SnO_2 薄膜を利用した光波長検出デバイスを提案し、その機能性の実証を目指した。

2. 研究の背景

半導体材料の一つである SnO_2 は、デバイス応用として、代表的には、ガス分子に対する感応性からガスセンサを構成する材料^[1]として広く用いられている材料である。一方で、光に対しても応答性を示し、フォトディテクタ^[2, 3]への応用についても研究が行われている。機能デバイスへのさらなる応用が期待されるものの、これまでの研究開発は、あくまで光強度の計測を行うためのものであり、光の重要な基礎的性質である光波長の計測への応用は行われていなかった。

本研究では、図 1 に示す SnO_2 薄膜を利用した光波長検出デバイスに関する研究を行った。具体的には、 SnO_2 が有する吸光特性^[4]を利用し光波長検出デバイスの実現を目指した。 SnO_2 薄膜に光が照射されたとき、吸光特性に依存し熱が生じる。この熱により変化する SnO_2 薄膜の電気的性質の変化を読み取ることで、光波長のズレを計測するというのが本提案デバイスの原理である。この原理は、図 1 に示すように、 SnO_2 薄膜をベースとした単純なデバイス構造で達成可能あり、デバイスの作製が極めて容易であることが期待される。

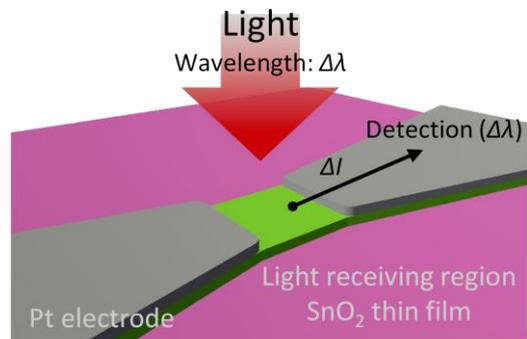


図 1 酸化スズ (SnO_2) 薄膜を利用した光波長検出デバイスの模式図

酸化スズ薄膜を利用した光波長検出デバイスの開発

Development of Wavelength Detection Device using Tin Dioxide Thin Film

3. 研究の方法

3.1 顕微ラマン分光法による SnO₂ 薄膜の物性評価

本研究では、後述するように、アニール処理を行った SnO₂ 薄膜を用いてデバイスを作製した。本稿では、まず、アニール処理に伴う SnO₂ 薄膜の物性の変化について述べる。

SnO₂ 薄膜の物性評価は、顕微ラマン分光法を用いて行った。この物性評価に用いた SnO₂ 薄膜は、Si 基板上に RF スパッタリングを用いて製膜したものであり、膜厚は 1 μm であった。アニール処理は、集光照射式赤外線真空炉 (IVF298WS, サーモ理工) を用いて、真空環境下 (約 10⁻³Pa) において行った。アニール温度は、200 °C, 400 °C, 600 °C とした。アニール時間は、目標温度まで 10 分で昇温し、その後 60 分間のアニール処理を行った。

ラマン分光測定では、顕微ラマン分光装置 (Nanofinder FLEX, 東京インスツルメンツ) を用いた。測定では、波長 532 nm のレーザーを用いた。図 2 にアニール処理無し、および各アニール温度でのラマンスペクトルを示す。50 cm⁻¹ から 850 cm⁻¹ の広域範囲のラマンスペクトルと、150 cm⁻¹ から 300 cm⁻¹ の狭域範囲のラマンスペクトルを示している。また、参考に、Si のラマンスペクトルも示している。

SnO₂ 薄膜には、製膜条件等によっては、SnO が混在する可能性がある。SnO に由来するピークは、ラマンスペクトル上において、113 cm⁻¹ 近傍や 211 cm⁻¹ 近傍に現れ、アニール処理とともに SnO 成分が減少しピークが消失する⁵⁾ことが知られている。本研究では、アニール処理なしの薄膜において、211 cm⁻¹ 近傍にブロードなピークが存在するものの、どちらのピークも明確なピークとして現れておらず、本研究で製膜した薄膜内において SnO 成分は少ないものと考えられる。また、狭域のラマンスペクトルに示されるように、アニール処理なし、および 200 °C のアニール処理を行った薄膜のラマンスペクトルに現れていた 211 cm⁻¹ 近傍のブロードなピークは、アニール処理温度の増加に伴い減少し、特に 400 °C 以上のアニール処理温度では、そのスペクトル強度が著しく減少した。このブロードなピークは、SnO と Si の合成ピークであり、アニール処理温度が高温になるとともにわずかに含まれていた SnO 成分が減少し、211 cm⁻¹ 近傍のスペクトル強度が減少したものと考えられる。400 °C や 600 °C でアニール処理を行った薄膜は、SnO 成分が少ない、良質な SnO₂ 薄膜と考えられる。本稿では、600 °C のアニール処理を行った薄膜を用いて作製した光波長検出素子について述べる。

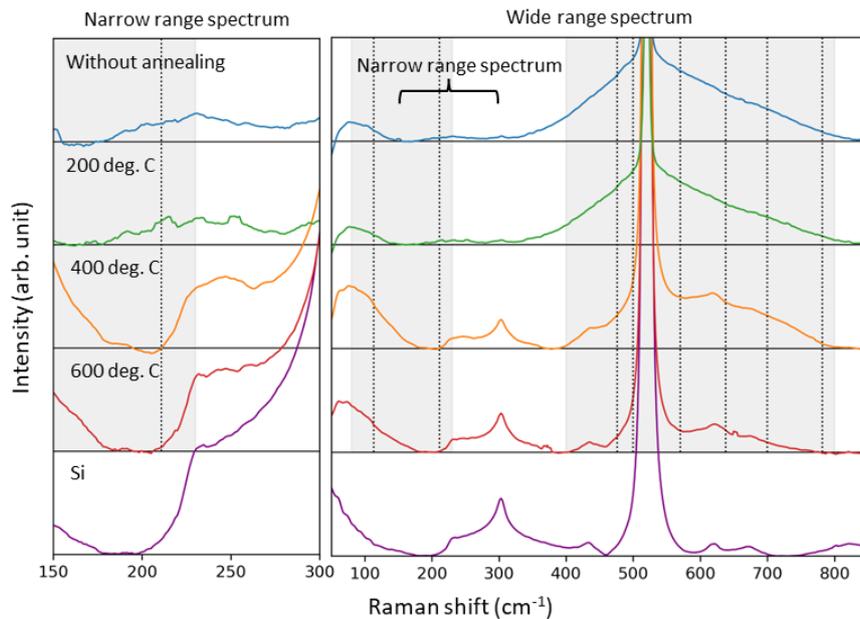


図 2 各温度でアニール処理を行った SnO₂ 薄膜 (膜厚: 1 μm) のラマンスペクトル

酸化スズ薄膜を利用した光波長検出デバイスの開発

Development of Wavelength Detection Device using Tin Dioxide Thin Film

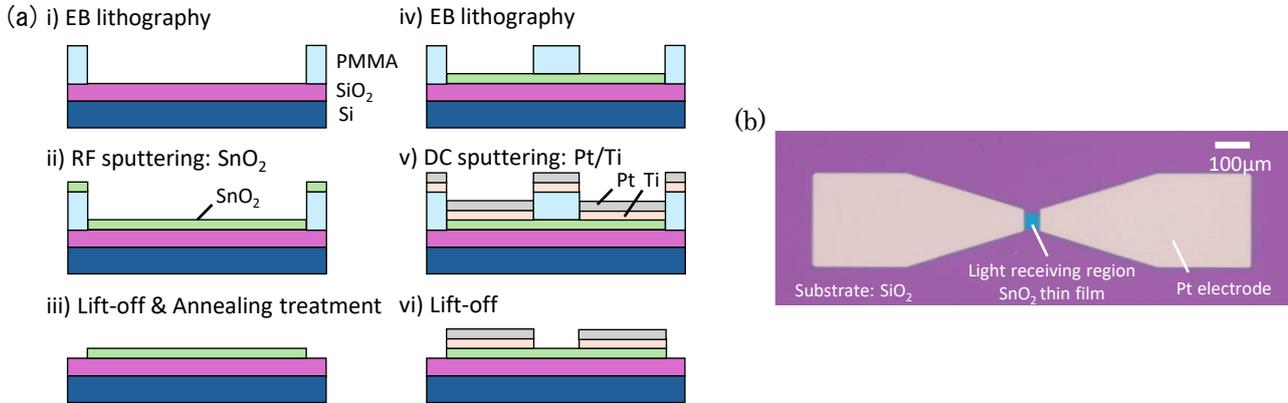


図3 酸化スズ (SnO₂) 薄膜を利用した光波長検出デバイスの作製 : (a)作製プロセス模式図, i) 電子ビームリソグラフィによる SnO₂ 薄膜受光部パターン形成, ii) RF スパッタリングによる SnO₂ 薄膜の製膜, iii) リフトオフ法による SnO₂ 薄膜受光部構造の形成, 及びアニール処理, iv) 電子ビームリソグラフィによる電極パターンの作製, v) DC スパッタリングによる Pt/Ti 薄膜の製膜, vi) リフトオフ法による Pt 電極の作製, (b) 受光部として SnO₂ 薄膜を有する光波長検出デバイスの光学顕微鏡写真

3.2 光波長計測デバイスの作製

図 3(a)に SnO₂ 薄膜を利用した光波長検出デバイスの作製プロセス模式図を示す。本研究では、SiO₂(膜厚: 280 nm)/Si 基板上にデバイスを作製した。図 3(a) - i) に示すように、電子ビームリソグラフィにより受光部となるレジストパターンを形成した。レジストには PMMA (PMMA 950 A5, MicroChem Corp.) を用いた。その後、RF スパッタリングを用いて SnO₂ 薄膜を製膜 (図 3(a) - ii)) した。膜厚は、100 nm である。さら

に、アセトンを用いたリフトオフプロセスにより SnO₂ 薄膜からなるデバイスパターンを形成した (図 3(a) - iii))。また、先述の通り、薄膜内の SnO 成分を低減させるために、真空下 (約 10⁻³ Pa) で 600°C のアニール処理を 60 分間行った。

続いて、図 3(a) - iv) に示すように、SnO 薄膜デバイスパターン上に、電子ビームリソグラフィにより電極となるレジストパターンを形成し、DC スパッタリングにより、Pt 及び Ti を製膜した (図 3(a) - v))。膜

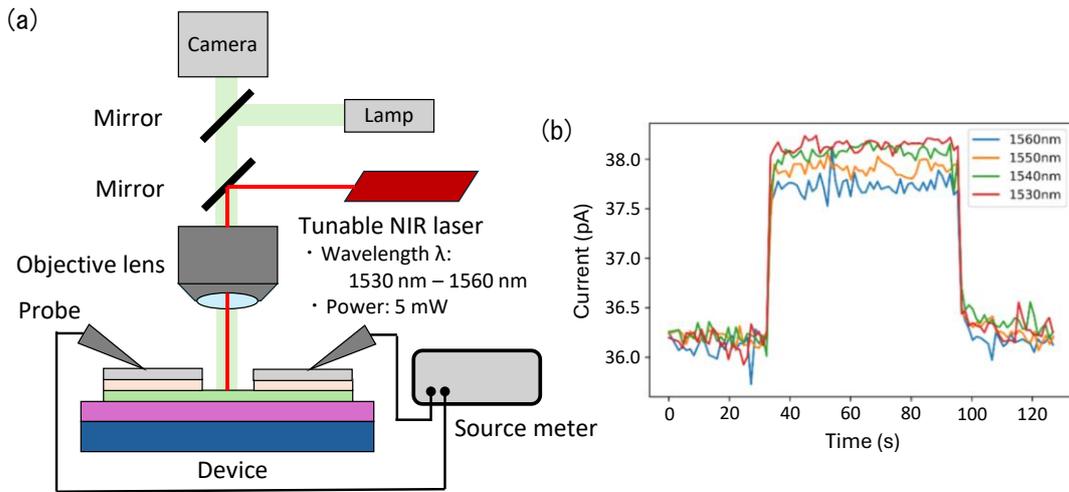


図4 酸化スズ (SnO₂) 薄膜を利用した光波長検出デバイスの受光特性評価: (a) 受光特性評価の評価系, (b) 各波長 (1530 nm~1560 nm) の光の受光に伴うデバイス (SnO₂ 薄膜膜厚: 100 nm) の電流変化特性

酸化スズ薄膜を利用した光波長検出デバイスの開発

Development of Wavelength Detection Device using Tin Dioxide Thin Film

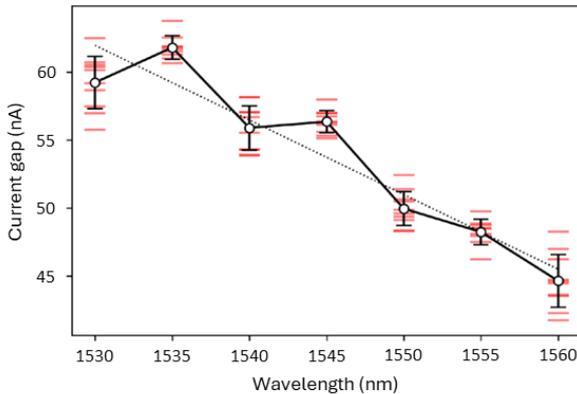


図 5 SnO₂ 薄膜を利用した光波長検出デバイスの光波長検出特性

厚は、Pt 層を 300 nm, Ti 層を 20 nm とした。Ti 層は、接着層である。最後にリフトオフ法により Pt 電極構造を形成し (図 3(a) – vi)、デバイスを作製した。

図 3(b)に、作製した光波長計測デバイスの光学顕微鏡写真を示す。作製したデバイスの受光部のサイズは、50 μm × 50 μm である。

3.3 光波長検出特性の評価

作製した膜厚 100 nm の SnO₂ 薄膜を有する光波長計測デバイスの受光特性を評価した。図 4(a)にその評価系の模式図を示す。計測は顕微鏡下で行い、デバイスの受光部の位置決めを行った後、計測対象となる近赤外光を受光部へ照射した。近赤外光の光源として、波長可変レーザー (N7711A, Keysight) を用いた。波長は 1530 nm ~ 1560 nm, 対物レンズからの出射パワーが 5 mW の光を受光部へ照射した。また、光を照射した際の SnO₂ 薄膜からなる受光部の電気特性の変化は、電流計測を通して行った。この測定では、Keithley 2636B を用いた。図 4(b)に、各波長 (1530 nm, 1540 nm, 1550 nm, 1560 nm) の光照射時及び非照射時の受光部の電流変化を示す。このように、作製したデバイスは、光照射に対し感応することがわかる。

また、図 5 は、照射光の波長と電流値変化の関係を示している。照射光の波長が大きくなるにつれ電流値変化が小さくなっていくことがわかる。波長変化と電流値変化量から算出した波長検出分解能は、約 1.7 nm であった。

4. 将来展望

本研究では、SnO₂ 薄膜の吸光特性を活用した光波長計測デバイスの研究を行い、SnO₂ 薄膜ベースのデバイス構造で光波長のズレを検出できることを実証した。このセンシング手法に立脚し、SnO₂ 薄膜の自体の吸光特性などの物性制御や、デバイス構造や動作原理の研究開発、開拓をすすめることにより、さらなる高性能化、機能化が予測される。この光波長検出デバイスの高性能化、機能化は、様々な分野での新たなアプリケーションを切り開くものと考えられる。

おわりに

本稿では、極めてシンプルな作製プロセスで達成可能な光波長検出デバイスについて紹介した。光波長は、様々な分野、産業で活用される光の基礎的性質である。その応用可能性は広く、本提案の光波長検出デバイスの高性能化、機能化を進めることにより、製造が容易で、光通信分野をはじめ、物質や材料の分析分野、センサ分野など様々な分野に応用可能な新たなデバイスの創出が期待される。

参考文献

- [1] Y. Matsud, Sensors and Actuators B: Chemical 364, 131876 (2022).
- [2] H. Chen, L. Hu, X. Fang, L. W, Advanced Functional Materials 22, 1229 (2012).
- [3] P. Chetri, J. C.. Dhar, Semiconductor Science and Technology 35, 045014 (2020).
- [4] 日本学術振興会 透明酸化物光電子材料 166 委員会, 透明導電膜の技術. オーム社, 1999.
- [5] J. Geurts, S. Rau, W. Richter, F.J. Schmitte, Thin Solid Films 121, 217 (1984).

関連文献

- [1] 太田 涼介, 割澤 伸一, 米谷 玲皇, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会 予稿集, 16a-B410-7 (2023).

この研究は、令和 3 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 4~5 年度に実施されたものです。