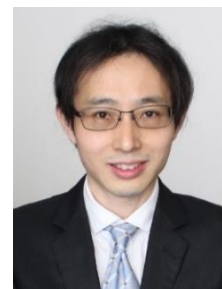


ゲルマニウム中赤外光集積回路を用いた革新的分子スキャナの開拓

研究代表者

竹中 充 東京大学大学院工学系研究科 准教授



1. 研究の背景と達成目標

近年、中赤外光を用いた分子センシングが注目を集めている。波長 $2\ \mu\text{m}$ から $15\ \mu\text{m}$ の中赤外光に対して分子振動に応じた固有の光吸収があることから、中赤外光の吸収スペクトルを測定することで、様々な分子を高精度に検出することが期待できる。様々な分子を検出可能であることから、医療用センサー、ガスセンサー、食品モニター、環境モニター等々の幅広い応用が期待されている。しかし、中赤外光の測定器は非常に大きくかつ高価なため、その利用は限られている。本研究では、中赤外光全域で透明な材料であるゲルマニウム (Ge) を導波路材料とした中赤外光集積回路を用いて、分子検出光センシングスキャナチップの実現を目指した。主に、①n型 Ge-on-insulator (GeOI)基板の作製プロセスの確立および Ge 光導波路の低損失化、高 Q 値リング共振器の実証、②熱光学効果を用いた Ge 光位相シフタの動作実証および波長可変フィルタの実証、③グラフェン黒体放射光源の特性解析、中赤外 Ge 受光器の動作実証、などを目指した研究を進め、小型かつ高感度な分子スキャナチップを実現可能な基盤技術の確立を目指した。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- ・低電子密度 n 型 Ge-on-insulator 基板の実現および低損失 Ge 光導波路の実証

低欠陥 Ge-on-insulator 基板が実現し、Ge を使って大規模な光回路ができることを実証した。

- ・Ge-on-insulator 基板を使った熱光学位相シフタの動作実証

既存の Si 素子よりも高効率に動作することを実証すると共に、波長可変フィルタなどの可変光素子に応用した。これにより様々なセンシングに利用できる Ge 光回路が実現可能となった。

- ・Ge 導波路を用いた欠陥誘起受光器の動作実証

本来透明である中赤外波長に対して感度を持つ受光器を世界で初めて実証した。種々のセンシング用受光器として応用が可能である Ge 中赤外光集積回路の可能性を大きく広げる成果と言える。

3. 研究成果

GeOI 基板作製時の水素イオン注入によって発生する結晶欠陥を低減することで、欠陥誘起ホールを抑制し、n 型 GeOI 基板 (図 1) を作製することに成功した。これによりホール起因の自由キャリア吸収を除去して、Ge 光導波路の損失低減に成功した。Ge 導波路低損失化の結果、Q 値が 18,000 以上のリング共振器の実証に成功した。また GeOI 基板上で初めて熱光学光位相シフタの実証に成功し、リング共振器上に集積することで波長可変フィルタの動作実証に成功した (図 2)。グラフェンを Si 導波路上に集積した黒体放射光源の特性を解析し中赤外光源として使用可能であることを明らかにすると共に、結晶欠陥を利用したサブバンドギャップ Ge 中赤外受光器を世界で初めて動作実証した (図 3)。

また Ge リング共振器を用いた水素センシングにも成功するなど、次世代センシング光集積回路の基盤技術を確立した。

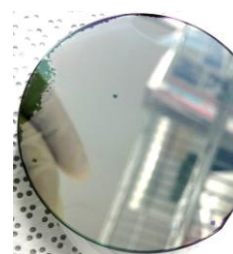


図 1. 貼り合わせで作製した GeOI 基板。

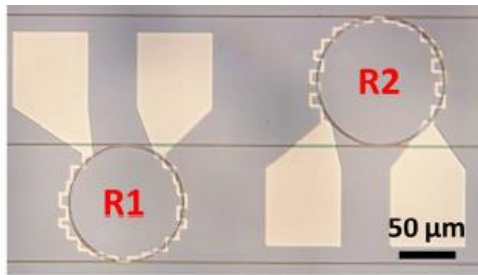


図 2. 波長可変リング共振器フィルタ。

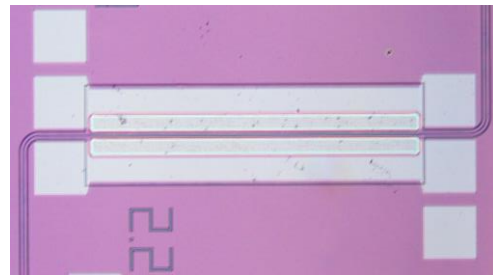


図 3. 中赤外 Ge 受光器。

4. 今後の展開

今回の成果により、様々な分子をセンシング可能な大規模中赤外光集積回路実現につながる基盤技術を確立できたと言える。今後は、導波路型分光器や光変調器、受光器などを一体集積したセンシングチップの研究を進める予定である。また中赤外光集積回路は量子応用も検討されており、新たな応用への展開も期待される。

5. 発表実績

- [1] Z. Zhao, C.-P. Ho, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka, “Monolithic Germanium PIN Waveguide Photodetector Operating at 2 μ m Wavelengths,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC2020)*, W4G.3, San Diego, 8–12 March 2020.
- [2] C.-P. Ho, Z. Zhao, Q. Li, S. Takagi, and M. Takenaka, “Tunable germanium-on-insulator band-stop optical filter using thermo-optic effect,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 1–7, April 2020.
- [3] Z. Zhao, C.-P. Ho, S. Takagi, and M. Takenaka, “Efficient germanium variable optical attenuator at 1.95 μ m wavelength using spin-on-glass doping,” *European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*, P19, Dublin, Ireland, 22–26 September 2019.
- [4] C.-P. Ho, Z. Zhao, Q. Li, S. Takagi, and M. Takenaka, “Mid-infrared tunable Vernier filter on a germanium-on-insulator photonic platform,” *Optics Letters*, vol. 44, no. 11, pp. 2779–2782, June 2019.
- [5] Y. Taguchi, S. Takagi, and M. Takenaka, “Numerical analysis of Ge/Si hybrid MOS optical modulator operating at mid-infrared wavelength,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 58, SBBE03, 2019.
- [6] T. Fujigaki, S. Takagi, and M. Takenaka, “High-efficiency Ge thermo-optic phase shifter on Ge-on-insulator platform,” *Optics Express*, vol. 27, no. 5, pp. 6451–6458, 2019.
- [7] J. Kang, S. Takagi, and M. Takenaka, “Ge photodetector monolithically integrated with amorphous Si waveguide on wafer-bonded Ge-on-insulator substrate,” *Optics Express*, vol. 26, no. 23, pp. 30546–30555, 2018.
- [8] T.-H. Xiao, Z. Zhao, W. Zhou, M. Takenaka, H.-K. Tsang, Z. Cheng, and K. Goda, “High-Q germanium optical nanocavity,” *Photonics Res.*, vol. 6, no. 9, pp. 925–928, 2018.
- [9] G. Z. Mashanovich, M. Nedeljkovic, J. Soler-Penades, Z. Qu, W. Cao, A. Osman, Y. Wu, C. J. Stirling, Y. Qi, Y.X. Cheng, L. Reid, C. G. Littlejohns, J. Kang, Z. Zhao, M. Takenaka, T. Li, Z. Zhou, F. Y. Gardes, D. J. Thomson, and G. T. Reed, “Group IV mid-infrared photonics,” *Optics Materials Express*, vol. 8, no. 8, pp. 2276–2286, 2018 (*invited*).
- [10] T. H. Xiao, Z. Zhao, W. Zhou, C.-Y. Chang, S. Y. Set, M. Takenaka, H. K. Tsang, Z. Cheng, and K. Goda, “Mid-infrared high-Q germanium microring resonator,” *Optics Letters*, vol. 43, no. 12, pp. 2885–2888, 2018.