

1. 氏名	竹中 充
2. 所属機関	東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻
3. 研究題目	ゲルマニウムを用いた高効率中赤外光変調器の開発

4. 研究の目的:

光ファイバー通信、自由空間光通信用途に加えて、医療応用などのセンシング用途への期待の高まりから、波長 2 μm から 15 μm 程度の中赤外光への関心が近年高まりを見せている。しかし、従来の中赤外光デバイスは大型かつ高価であり、中赤外光の利用は限定的となってしまう。そこで、近年、Si 基板上に光集積回路を作製するシリコンフォトニクス技術の中赤外光向けに転用し、中赤外光集積回路を実現する機運が高まっている。中赤外光で動作する大規模光集積回路を実現することで、小型チップを安価かつ大量に製造可能になり、新しい中赤外光応用が拓けるものと期待されている。一方、Si は波長 8 μm より長波長の中赤外光に対しては吸収が増えてしまう問題あることから、中赤外全域で透明な Ge が導波路材料として注目を集めている。

我々は、世界に先駆けて、中赤外全域で動作可能な Ge 中赤外光集積回路プラットフォームを提唱し、研究を進めている。Ge は中赤外光に対して、種々の優れた光物性を持つものと期待されている。その中でも、Ge 中の自由キャリア吸収を用いた高効率光変調に期待が寄せられているが、これまでほとんど研究が進められていない。このことから、中赤外光における Ge の自由キャリア吸収を明確にし、光変調原理を確立することが極めて重要となっている。本研究では、中赤外光に対する Ge の自由キャリア吸収を明らかにし、高効率 Ge 光変調器を実現することを目的とする。

5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):

研究が進められている中赤外光集積回路プラットフォームの比較を図 1 に示す。シリコンフォトニクスのプラットフォームをそのまま転用した Si on insulator 構造や Ge on Si 構造がこれまで研究されているが、動作波長や導波サイズ、変調効率などに課題をもつ。一方、本提案では Ge on insulator (GeOI) 構造を用いた中赤外光集積回路の研究を進める。吊り下げ構造を用いることで中赤外全域で動作し、導波路サイズも小さく、光変調効率も最も高いことが期待される。GeOI 基板上に光導波路を形成し、キャリア注入型光変調器を作製することで、Ge 中の自由キャリア効果を詳細に評価することで、光変調器としての性能を明らかにする。

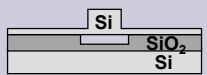


プラットフォーム	本提案		
	(a) Si on insulator	(b) Ge on Si	(c) Ge on insulator
導波路構造			
吊り下げ構造	○	×	○
使用可能波長	1.2 - 7 μm	2 - 7 μm	2 - 15 μm
導波路サイズ	小	大	小
光変調効率	×	△	◎

図 1. 中赤外光集積回路プラットフォーム比較。

6. 研究の成果と結論、今後の課題:

ウェハボンディングとスマートカットにより高品質な GeOI 基板の作製を進めた (図 2)。Ge バルク基板に水素イオンを注入後、Si 基板に貼り合わせる。その後アニールにより Ge 基板を剥離し、表面を研磨することで、極めて平坦な GeOI 基板を作製した。

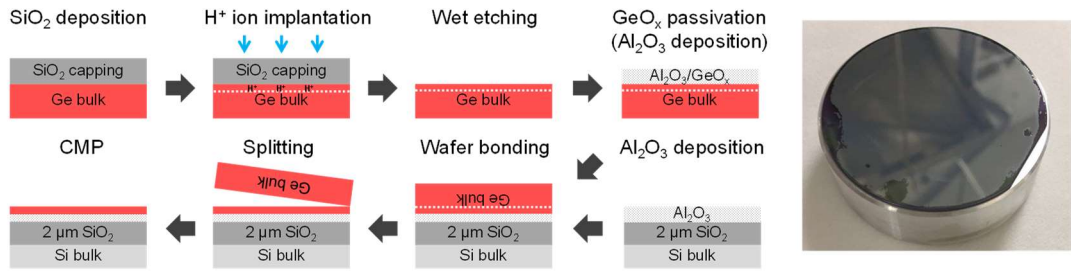


図 2. ウェハボンディングで作製した GeOI 基板。

作製した GeOI 基板を用いて、キャリア注入型光変調器の作製を進めた (図 3)。キャリア注入の効率を高めるには、不純物濃度を高くしつつ、欠陥の少ない PIN 接合を Ge 導波路に形成することが重要となる。特に n 型不純物のドーピングが課題である。本研究では、n 型不純物であるリンを表面に塗布したスピノングラスから固相拡散させる新しい作製手法を導入して光変調器を作製した。

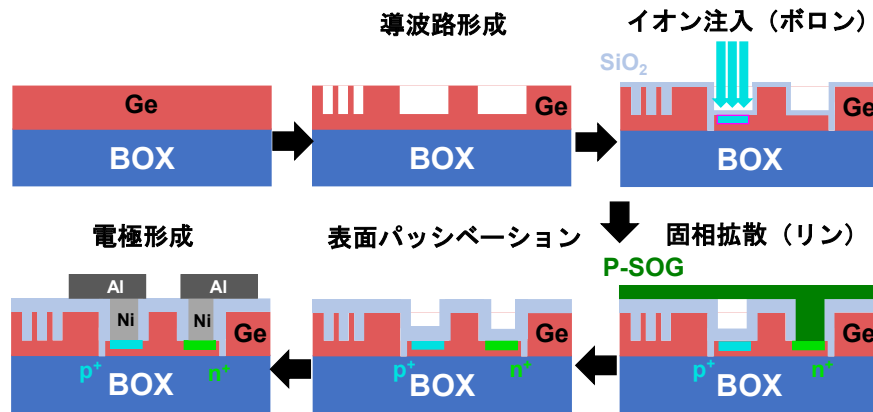


図 3. キャリア注入型 Ge 光変調器の作製プロセス。

作製したキャリア注入型 Ge 光変調器の電子顕微鏡写真および光変調特性結果を図 4 に示す。固相拡散を用いた不純物ドーピングにより変調効率をこれまでより 4 倍程度改善することに成功した。また、Ge 中の自由キャリア効果モデルを使った数値計算ともよく一致することが分かった。キャリア寿命が 0.4 ns と短いことが予想されることから、より一層の GeOI 基板の高品質化が効率改善に求められることが明らかになった。

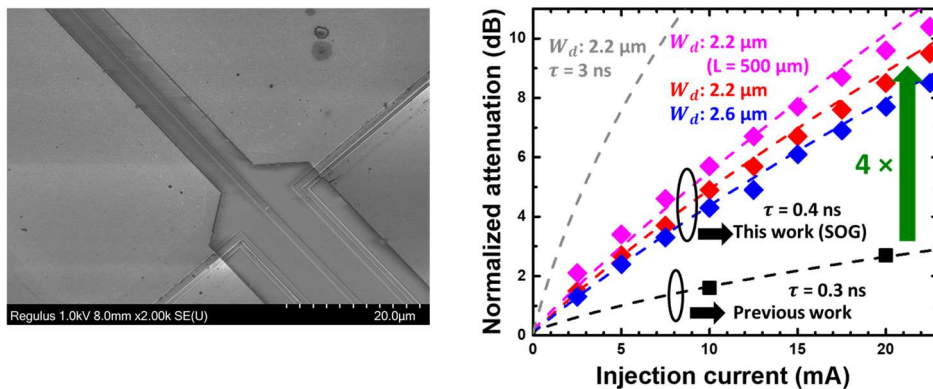


図 4. 作製したキャリア注入型 Ge 光変調器の電子顕微鏡写真と変調特性結果。

7. 成果の価値

7.1_学術的価値:

本研究を通じて、Ge中の自由キャリア効果の理論モデルを光変調特性の実験結果から検証することが出来た。得られた実験結果は理論モデルから予測される変調特性と一致することから、理論モデルの正しさを明確にすることができた。理論モデルは、高効率光変調器を実現する上で重要な指針となることから、今回の成果は学術的価値が高いと言える。本成果を通じて、中赤外光におけるGeの光物性の理解が学術的に進展することが期待される。それにより、光変調器などの応用の発展が望まれる。また、中赤外光集積回路の研究も促進されることから、現時点では不十分な光源、変調器、受光器、光スペクトルアナライザなどの中赤外光機器の技術進歩も促進され、中赤外領域における新たな科学的発見にも貢献することが期待できる。

7.2_社会的価値:

今回の研究成果により、中赤外波長領域においても高効率な光変調が可能になったことで、これまで十分に活用されてこなかった中赤外光通信の進展が望まれる。光ファイバー通信は近赤外光を用いた通信容量拡大が限界に近付いており、中赤外光を用いることで飛躍的に通信容量を拡大することが期待される。また大気吸収が小さい中赤外波長域を使った高速自由空間光通信の進展も望まれ、光無線通信技術の新たな領域を開拓できるものと期待できる。ロックイン検波を用いた高感度センシングも中赤外光集積回路上で可能になることから、様々な医療診断に用いる分子センサーを安価に誰でも利用可能になることが期待できる。これにより早期に病気を発見することが可能になり健康寿命を延ばし、Quality of Life (QOL)向上に資するものを期待される。

7.3_研究成果:

・「研究論文(原著)」

- [1] ○Z. Zhao, C.-P. Ho, Q. Li, Z. Lin, K. Toprasertpong, S. Takagi and M. Takenaka, "Efficient mid-infrared germanium variable optical attenuator fabricated by spin-on-glass doping," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no.17, pp. 4808–4816, May 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] 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.

・「国際会議発表」

- [4] M. Takenaka, Z. Zhao, C.-P. Ho, T. Fujigaki, K. Toprasertpong, and S. Takagi, "Germanium mid-infrared integrated photonics on GeOI platform," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2021)*, SM3J.3, 9–14 May 2021. [招待]
- [5] Z. Zhao, C.-P. Ho, Q. Li, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka, "Two-micrometer monolithic germanium waveguide photodetector integrated with lateral PIN junction," *10th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2020)*, S-12, Tokyo, 30 November–1 December 2020.
- [6] Z. Zhao, C.-P. Ho, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka, "Monolithic Germanium PIN Waveguide Photodetector Operating at 2 μm Wavelengths," *Optical Fiber Communication Conference (OFC2020)*, W4G.3, San Diego, 8–12 March 2020.
- [7] Z. Zhao, C.-P. Ho, S. Takagi, and M. Takenaka, "Efficient germanium variable optical attenuator at 1.95 μm wavelength using spin-on-glass doping," *European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*, P19, Dublin, Ireland, 22–26 September 2019.
- [8] C.-P. Ho, Z. Zhao, Q. Li, S. Takagi, and M. Takenaka, "Coupled-resonator-induced-transparency on germanium-on-insulator mid-infrared platform," *International Conference on Group IV Photonics (GFP2019)*, FD5, Singapore, 28–30 August 2019.
- [9] M. Takenaka and S. Takagi, "Ge-on-insulator platform for mid-infrared integrated photonics," *IEEE Summer Topicals Meeting Series*, TuA4.2, Waikoloa, Hawaii, US, 9–11 July 2018. [招待]