

令和 3 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13798

研究課題名(和文) Acute nose-on-a-chip based on mid-infrared graphene-on-silicon hybrid photonic-plasmonic waveguides

研究課題名(英文) Acute nose-on-a-chip based on mid-infrared graphene-on-silicon hybrid photonic-plasmonic waveguides

研究代表者

CHENG Zhenzhou (Cheng, Zhenzhou)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・客員共同研究員

研究者番号：50772092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：私たちは、JSPS科研費の支援のもと、IV族材料を用いた高度なラマン分光技術とオンチップ光集積デバイスの研究を行い、多孔質カーボンナノワイヤーアレイとシリコンナノディスクアレイ基板を用いてラマン分光法とラマン光学活性の向上を実証した。一方、私たちは、光の偏光制御、電気光学変調、生化学的センシングなどのさまざまな用途に向けて、新規のグラフェン・オン・シリコン導波路デバイスを設計し、開発した。これまでの成果をもとに、Nature Communications、ACS Photonicsなどに11本のジャーナル論文を発表するとともに、学会では7件の招待講演と8件の口頭発表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した手法は、ラマン分光法とセンシングにおけるナノフォトニクス応用の後押しするために重要な基盤技術となり得る。今後は新しいナノ構造基板を開発し、光と物質の相互作用メカニズムを追究する事で、分析化学、構造ウイルス学、及び製薬科学の分野において更なる発展が期待される。

研究成果の概要(英文)：Under the support of the KAKENHI fund, we have studied advanced Raman spectroscopic techniques and on-chip optoelectronic integrated devices based on group-IV materials. On the one hand, we demonstrated enhanced Raman spectroscopy and enhanced Raman optical activity based on the porous carbon nanowire array and silicon nanodisk array substrates, respectively. On the other hand, we have designed and developed novel graphene-on-silicon waveguide devices for various applications in light polarization control, electro-optical modulation, and biochemical sensing. Based on the previous results, we have published eleven journal papers in Nature Communications, ACS Photonics, Optics Express, IEEE Photonics Journal, Applied Physics Express, and so forth, as well as presented seven invited talks and eight oral speeches in conferences.

研究分野：応用物理学

キーワード：ラマン分光法 ガス検知 シリコンフォトニクス グラフェン

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンパクトでスマートな生化学センサーは、人工知能、モノのインターネット、ウェアラブルデバイスで幅広く使用されているため、大きな注目を集めている。ガス検知を例にとると、電気化学ガスセンサー[J. Wang et al. Nanotechnology 2006]、電界効果トランジスタガスセンサー、[F. Schedin et al. Nature Materials 2007]、および光学式ガスセンサー[J. Wo et al. Optics Letters 2012]など、いくつかのコンパクトなセンサーが提案され、実証されている。その中でも、光学センサーは、高感度、安定性、化学的特異性、電磁耐性というメリットがある。過去数十年にわたって、マイクロファイバーセンサー[J. Wo et al. Optics Letters 2012]、表面プラズモン共鳴センサー[M. Cittadini et al. Carbon 2014]、およびオンチップ光学センサー[D. Kita et al. IEEE JSTQE 2017]などのさまざまな光学ガスセンサーが開発されてきた。マイクロエレクトロニクスにおける今日の最先端の製造を利用して、IV族材料ベースの光学センサーは低コストで商業化される有望な可能性を秘めている。さらに、そのような光学ガスセンサーは、信号処理および通信のための電子デバイスとさらに統合することができる。したがって、IV族材料ベースの光学センサーは、次世代センシング技術の有望な候補と考えられている。ただし、チップ上の光と分子の間の適度な相互作用により、センサーの検出限界が制限される。

2. 研究の目的

本研究は、高感度の生化学的センシングを実現するために、IV族材料、すなわちグラフェン、カーボンナノワイヤー、シリコンを使用して、新しいナノフォトニックデバイスに基づく高度な分光技術を開発することである。

3. 研究の方法

本研究の方法には、トップダウン製造を使用して合理的に設計されたフォトニクスデバイスと、ボトムアップ製造を使用して低コストで合成されたナノ構造が含まれる。一方では、有限要素法ソフトウェアを使用してシリコンオンインシュレータウェーハに基づくフォトニックデバイスの構造を最適化し、電子ビームリソグラフィを使用して設計したデバイスを製造した。一方、電気化学的プロセスを使用してナノ材料を合成し、分光法およびセンシングアプリケーションにおけるナノ材料の特性を特徴づけた。

4. 研究成果

(1) 多孔質カーボンナノワイヤーアレイに基づく表面増強ラマン分光法表面増強ラマン分光法(SERS)は、金属基板上の局在表面プラズモン共鳴(LSPR)を励起することにより、本質的に弱い自発的ラマン散乱よりも数桁高い感度を提供するため、振動分光法の強力なツールである。ただし、SERSは、「ホットスポット」への強い依存、大きな光熱発生、および容易な酸化のために、再現性、均一性、生体適合性、および耐久性が犠牲となるため、生物医学的使用には信頼できない可能性がある。本研究では、これらすべての問題を克服するために、SERS基板として整理した多孔質カーボンナノワイヤーで構成される金属フリー(つまり、LSPRフリー)でトポロジ的に調整されたナノ構造を設計、製造し、それを実証した。具体的には、強力な広帯域電荷移動共鳴による高い信号増強($\sim 10^6$)だけでなく、ホットスポットがないことによる非常に高い再現性、酸化がないことによる高い耐久性、およびその蛍光消光能力を実現した。

(2) シリコンナノディスクアレイに基づくキラル場増強ラマン光学活性

ラマン光学活性 (ROA) は、水溶液中のキラル分子のコンフォメーション構造と挙動の研究に効果的であり、サンプル準備とコストパフォーマンスにおいて X 線結晶学や核磁気共鳴 (NMR) 分光法よりも有利である。ただし、ROA 信号は本質的にごくわずかである。キラルな光と物質の相互作用が弱いため、自発的なラマン散乱よりも 3~5 桁弱い。金属ナノ粒子上の LSPR は、ROA 信号を強化するために採用されているが、その光熱発生と、遠距離場から近距離場への光学キラリティーの効率的な伝達と強化ができなため、有害なスペクトルアーチファクトに悩まされている。本研究では、シリコンナノディスクアレイを考案し、そのダークモードを利用してこれらの制限を克服することにより、全誘電体のキラルフィールドで強化された ROA を示す。具体的には、化学的および生物学的エナンチオマーのペアとともに使用して、ROA 測定で無視できるアーティファクトを伴う 100 倍を超える強化されたキラル光分子相互作用を示す。

(3) 電界支援共鳴走査分光法

中赤外線 (Mid-IR) マイクロリング共振器 (MRR) は、生化学的センシングのために広く研究されてきた。ただし、温度変動は、屈折率 (RI) 検出にとって望ましくないクロスセンシティブ効果である。本研究では、この制限を克服するために、グラフェンオンシリコンデュアルモード MRR に基づく電界支援共鳴走査 (EARS) 分光技術を研究した。具体的には、提案手法に基づき、理論的には 1°C の温度変動でわずか 2% の RI 測定誤差を達成し、シングルモード MRR と比較して 10 倍改善された。さらに、この手法では単一波長の中赤外レーザーが使用されているため、特性評価のセットアップが大幅に簡素化される。また、EARS 技術の検出限界と測定範囲についても議論した。私たちの研究は、モノリシックにチップ統合されたセンシングアプリケーションを開発するための有望な方法を実証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 11件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Han Yingdong, Wang Jie, Wan Haoran, Wang Shuang, Hu Haofeng, Xiao Ting-Hui, Cheng Zhenzhou, Liu Tiegeng	4. 巻 1
2. 論文標題 Solution processable transition metal dichalcogenides-based hybrids for photodetection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Materials Science	6. 最初と最後の頁 288 ~ 298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nanoms.2019.09.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Chen Weicheng, Yue Gongcheng, Hu Haofeng, Cheng Zhenzhou, Lu Guo-Wei, Liu Tiegeng	4. 巻 12
2. 論文標題 Dual-Mode GVD Tailoring in a Convex Waveguide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JPHOT.2020.3005690	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yue Gongcheng, Xing Zhengkun, Hu Haofeng, Cheng Zhenzhou, Lu Guo-Wei, Liu Tiegeng	4. 巻 28
2. 論文標題 Graphene-based dual-mode modulators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 18456 ~ 18456
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.394409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Wu Jingwen, Yue Gongcheng, Chen Weicheng, Xing Zhengkun, Wang Jiaqi, Wong Wei Ru, Cheng Zhenzhou, Set Sze Yun, Senthil Murugan Ganapathy, Wang Xingjun, Liu Tiegeng	4. 巻 7
2. 論文標題 On-Chip Optical Gas Sensors Based on Group-IV Materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 2923 ~ 2940
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.0c00976	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Nan, Xiao Ting-Hui, Luo Zhenyi, Kitahama Yasutaka, Hiramatsu Kotaro, Kishimoto Naoki, Itoh Tamitake, Cheng Zhenzhou, Goda Keisuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Porous carbon nanowire array for surface-enhanced Raman spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-18590-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhang Enqing, Xing Zhengkun, Wan Dian, Gao Haoran, Han Yingdong, Gao Yisheng, Hu Haofeng, Cheng Zhenzhou, Liu Tiegeng	4. 巻 42
2. 論文標題 Surface-enhanced Raman spectroscopy chips based on two-dimensional materials beyond graphene	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Semiconductors	6. 最初と最後の頁 51001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1674-4926/42/5/051001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Xiao Ting-Hui, Cheng, Zhenzhou, Luo Zhenyi, Isozaki Akihiro, Hiramatsu Kotaro, Itoh Tamitake, Nomura Masahiro, Iwamoto Satoshi, Goda Keisuke	4. 巻 12
2. 論文標題 All-dielectric chiral-field-enhanced Raman optical activity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 N.A.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-23364-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Senmiao Han, Weicheng Chen, Haofeng Hu, Zhenzhou Cheng, and Tiegeng Liu	4. 巻 Vol. 37, Issue 6
2. 論文標題 Characterization method of a mid-infrared graphene-on-silicon microring with a monochromatic laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 1683-1688
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.391452	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Z. Xing, C. Li, Y. Han, H. Hu, Z. Cheng, J. Wang and T. Liu	4. 巻 vol. 27, no.14
2. 論文標題 Waveguide-integrated graphene spatial mode filters for on-chip mode-division multiplexing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 19188-19195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.019188	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Z. Xing, C. Li, Y. Han, H. Hu, Z. Cheng and T. Liu	4. 巻 vol. 12, no.7
2. 論文標題 Design of on-chip polarizers based on graphene-on-silicon nanowires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab235a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Xiao Ting-Hui, Zhao Ziqiang, Zhou Wen, Takenaka Mitsuru, Tsang Hon Ki, Cheng Zhenzhou, Goda Keisuke	4. 巻 6
2. 論文標題 High-Q germanium optical nanocavity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Photonics Research	6. 最初と最後の頁 925 ~ 925
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/PRJ.6.000925	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Zhenzhou Cheng
2. 発表標題 Mid-IR Group-IV photonics
3. 学会等名 Optoelectronics Global Conference (OGC), Shenzhen, China, 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1 . 発表者名 T. Xiao, Zhenzhou Cheng and K. Goda
2 . 発表標題 A giant chiroptical effect enabled by a dielectric spiral nanoflower
3 . 学会等名 The 79th The Japanese Society of Applied Physics (JSAP) Autumn Meeting, Nagoya, Japan, 2018
4 . 発表年 2018年 ~ 2019年

1 . 発表者名 T. Xiao, Zhenzhou Cheng and K. Goda
2 . 発表標題 Dielectric spiral nanoflower with a giant chiroptical effect
3 . 学会等名 Photonics West, San Francisco, USA, 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2018年 ~ 2019年

1 . 発表者名 W. Chen, Y. Luo, H. Hu, Zhenzhou Cheng and T. Liu
2 . 発表標題 Dual-mode GVD Tailoring in a Convex Germanium Waveguide
3 . 学会等名 Photonics Asia, Beijing, China, 2020
4 . 発表年 2020年 ~ 2021年

1 . 発表者名 G. Yue, W. Chen, H. Hu, G. Lu, Zhenzhou Cheng and T. Liu
2 . 発表標題 Design of a Graphene-based Multi-mode BPSK Modulator
3 . 学会等名 Photonics Asia, Beijing, China, 2020
4 . 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 Z. Cheng
2. 発表標題 Novel germanium platform for mid-infrared integrated optics
3. 学会等名 Optoelectronics Global Conference (OGC), Shenzhen, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Z. Cheng
2. 発表標題 Mid-infrared germanium photonics
3. 学会等名 The 12th International Photonics and OptoElectronics Meetings (POEM 2019), Wuhan, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Z. Cheng
2. 発表標題 Mid-infrared on-chip devices based on SOI and GOI technology
3. 学会等名 The 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN2019), Huangshan, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Z. Cheng
2. 発表標題 Mid-infrared suspended membrane photonic integrated circuits
3. 学会等名 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Rome, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Zhenzhou Cheng, T. -H. Xiao, Z. Zhao, W. Zhou, M. Takenaka, H. K. Tsang and K. Goda
2 . 発表標題 Mid-infrared germanium photonic integrated circuits for on-chip biochemical sensing
3 . 学会等名 The Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), Hong Kong, 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年 ~ 2019年

1 . 発表者名 Zhenzhou Cheng
2 . 発表標題 High-quality germanium suspended-membrane platform for mid-infrared applications
3 . 学会等名 Photonics Asia, Beijing, China, 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年 ~ 2019年

1 . 発表者名 Zhenzhou Cheng, T. -H. Xiao and K. Goda
2 . 発表標題 Graphene-on-silicon hybrid waveguide devices and applications
3 . 学会等名 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Toyama, Japan, 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年 ~ 2019年

1 . 発表者名 T. -H. Xiao, Z. Zhao, W. Zhou, M. Takenaka, H. K. Tsang, Zhenzhou Cheng, and K. Goda
2 . 発表標題 Mid-infrared germanium photonic integrated platform
3 . 学会等名 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Toyama, Japan, 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 Zhenzhou Cheng, T. Xiao, Z. Zhao, W. Zhou, C. Chang, S. Set, M. Takenaka, H. K. Tsang and K. Goda
2. 発表標題 Mid-infrared high-Q germanium resonators
3. 学会等名 Photonics West, San Francisco, USA, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Zhenzhou Cheng, T. Xiao, Z. Zhao, W. Zhou, C. Chang, S. Set, M. Takenaka, H. K. Tsang and K. Goda
2. 発表標題 Mid-infrared high-Q germanium photonic crystal cavity
3. 学会等名 The 79th The Japanese Society of Applied Physics (JSAP) Autumn Meeting, Nagoya, Japan, 2018
4. 発表年 2018年～2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Zhenzhou Cheng, Weicheng Chen, Tiegeng Liu	4. 発行年 2020年
2. 出版社 SPIE	5. 総ページ数 34
3. 書名 Mid-infrared Germanium Photonics	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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