

13-5405

超低閾値シリコンラマンレーザーの高効率化

代表研究者	大阪府立大学大学院工学研究科准教授	高橋和
協力研究者	京都大学大学院工学研究科教授	野田進
	京都大学大学院工学研究科准教授	浅野卓
	京都大学化学研究所教授	金光義彦

研究の目標

電子デバイスの絶対的な基幹材料であるシリコンを用いた光デバイスの研究は、光LSIチップや、光通信ネットワークの高速・省エネ化、医療・バイオ応用まで幅広い用途に対して行われている。長年、この研究分野の最大の足かせとなってきたのが、シリコンレーザーの欠如である。その中で、2005年にインテル社が開発したシリコンラマンレーザーは、大きな注目を集めたが、20 mWを超える閾値と、1 cm以上の共振器長を持ち、さらに、2光子吸収により発生する自由キャリアを除去するために、逆バイアスP-i-N構造を付加する必要があった。そのため、実用化にはほど遠く、性能改善も進まなかった。

本研究者は、2013年、フォトリソニック結晶ナノ共振器を用いて、インテル社のレーザーの1/10,000以下の発振閾値1 μ Wと共振器長10 μ mを持つcwシリコンラマンレーザーの開発に成功した。このデバイスは、P-i-N構造を必要とせず、純粋にバルクシリコンのみで、エネルギー変換効率4%、最大出力120 nWのレーザー発振を1.55 μ m帯で実現した。驚異的な低閾値化により、将来的には、発光効率の低いバルクシリコンからの自然放出光を励起光源として用いることも可能と予想される。つまり、現状の光励起型ではなく、電流注入型のレーザーも期待でき、実現すれば、シリコンフォトリソニック産業の起爆剤となりうる。この最終目標に向けて、早急にレーザー発振の高効率化に取り組む必要があり、本研究では、インテルのデバイスの最高効率20%を超えるデバイスをP-i-N構造なしで実現することを目標とする。

研究経過および成果

本デバイスの低閾値発振は、高Q値ナノ共振器を用いて共振器中の光密度を高めたこと、ナノ共振器構造を工夫して誘導ラマン散乱確率を高めたことで実現された¹⁻⁴⁾。一方、レーザーの高効率化を阻んでいる主な原因は、2光子吸収キャリアが、自由キャリア吸収を引き起こすためである。本研究者は、高効率化の鍵を、ラマン散乱確率を向上させること、2光子吸収の影響を低減させることの2つと予想した。そこで、

発振メカニズムを解明しつつ、①共振器構造の改良、②最適なQ値と動作波長の探索、③表面処理などによるキャリア寿命の短縮という3つのアプローチを取ることにした。これらの研究遂行に当たっては、数値計算とプロセスにおいて京都大学野田研究室と、キャリア寿命については京都大学金光研究室と協力した。

1年目は、学生配属が受けられないという誤算があり、共振器構造の改良に着手できなかったが、Q値を変えたサンプルの作製と評価、表面状態の検討を行い、エネルギー効率15%をチャンピオンデータとして取得できた。しかし、安定して効率10%を超えるサンプルが作製できたわけではなく、効率増大のメカニズムも未解明であった。

2年目は、効率20%の達成と、安定的に高効率化を達成することを目指した。理論検討の結果、高効率化には高Q値化が重要であると判明したため、ナノ共振器のQ値向上に取り組んだ。当初は、なかなかQ値を上げることができなかったが、要因を夏ごろに特定して、従来の4倍強のQ値を持つサンプルにおいて、最大効率25%以上を得ることに成功した。また、同一構造を持つ50個のサンプルを測定して、効率20%以上を安定して得るための問題点を洗い出した。

2年目途中に、本助成金を用いて、電子線顕微鏡(FE-SEM)を購入した。この装置を用いて取得したサンプル像を図1に示す。FE-SEMはナノデバイス研

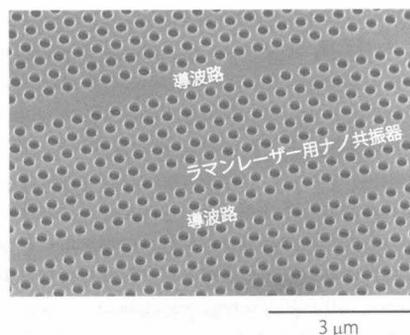


図1 作製したサンプルのSEM像

究に不可欠であり、研究室の学生全員が利用している。他部局の研究者にも開放して、機器の有効活用に努めている。

最終年度は、メカニズムの解明と共振器構造の改良を進めた。時間分解測定を行ったところ、2光子吸収による共振波長シフトが発振メカニズムに強く影響していることが新たに分かった。つづいて、ナノ共振器の体積を従来構造よりも3倍に増やしたラマンレーザーを作製したところ、80%という発振サンプル歩留まりが得られた。共振器構造を縮小することで、発振波長を1.3 μm に短波化することにも成功したが、ラマン散乱確率が向上するかは、現在検討中である。

3年間の研究により、シリコンラマンレーザーの効率を25%以上に向上できた。FE-SEMが購入できたことで、研究環境が大幅に改善され、ラマンレーザーの大量作製への目途も立てた。2020年ころには、電流注入型シリコンレーザーを実現したい。

主な発表や論文

- 高橋和：シリコンフォトニック結晶による光励起ラマンレーザー発振(光の最前線から), 応用物理, **83**, 6, 448-451 (2014).
- 高橋和：フォトニック結晶ナノ共振器を用いた超低閾値ラマンシリコンレーザー, 固体物理, **49**, 8, 483-490 (2014).
- 高橋和：マイクロワット閾値を持つシリコンラマンレーザー, 化学工業, **67**, 2, 112-116 (2016).
- 高橋和：高Q値ナノ共振器シリコンラマンレーザー：フォトニック結晶を用いた小型シリコンレーザー開発, 光アライアンス, **27**, 8, 52-55 (2016).
- D. Yamashita, Y. Takahashi, T. Asano and S. Noda: Raman shift and strain effect in high-Q photonic crystal silicon nanocavity, Optics Express, **23**, 3951-3959 (2015).
- T. Nakamura, Y. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano and S. Noda: Improvement in the quality factors for photonic crystal nanocavities via visualization of the leaky components, Optics Express, **24**, 9541-9549 (2016).
- T. Asano, Y. Ochi, Y. Takahashi, K. Kishimoto and S. Noda: Photonic Crystal Nanocavity with a Q-Factor exceeding eleven million, Optics Express, **25**, 1769-1777 (2017).
- K. Maeno, Y. Takahashi, T. Nakamura, T. Asano and S. Noda: Analysis of high-Q photonic crystal L3 nanocavities designed by visualization of the leaky components, Optics Express, **25**, 367-376 (2017).
- T. Ihara, Y. Takahashi, S. Noda and Y. Kanemitsu: Enhanced radiative recombination rate for electron-hole droplets in a silicon photonic crystal nanocavity, Physical Review B, **96**, 035303 (2017).
- K. Ashida, M. Okano, M. Ohtsuka, M. Seki, N. Yokoyama, K. Koshino, M. Mori, T. Asano, S. Noda and Y. Takahashi: Ultrahigh-Q photonic crystal nanocavities fabricated by CMOS process technologies, Optics Express, **25**, 18165-18174 (2017).
- Y. Takahashi (invited): Raman silicon laser using photonic crystal nanocavity, Photonics Asia 2014, **9277-20**, Beijing, China.
- Y. Takahashi and S. Noda (invited): Microwatt-threshold Raman silicon laser using photonic crystal high-Q nanocavity, Photonics West 2015, **9382-26**, San Francisco, USA.
- D. Yamashita, Y. Takahashi, T. Asano and S. Noda: A Sub-microwatt Threshold Raman Silicon Laser Using a High-Q Nanocavity, CLEO-PR 2015, **7376370**, Busan, Korea.
- K. Ashida, M. Okano, M. Ohtsuka, M. Seki, N. Yokoyama, K. Koshino, M. Mori, Y. Takahashi, T. Asano and S. Noda: Photonic crystal nanocavities with Q factor of 2 million fabricated by CMOS compatible process, Photonics West 2017, **10098-67**, San Francisco, USA.
- D. Yamashita, Y. Takahashi, T. Asano and S. Noda: Lasing dynamics of microwatt-threshold Raman silicon lasers using high-Q nanocavities, Photonics West 2017, **10098-67**, San Francisco, USA.
- 高橋和, 岡野誠: シリコンラマンレーザーの工業化に道, 超高Q値光ナノ共振器の大量作製に成功, 日刊工業新聞, 化学工業日報, Yahoo ニュース他, 2016年3月.
- 第37回レーザー学会年次大会優秀論文発表賞: 1310/1550 nm帯で動作するシリコンラマンレーザーの1チップ集積, 桑原充輝, 高橋和, 野田進.