

研究報告書

「フォトリック結晶ナノ共振器シリコンラマンレーザの開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 21 年 10 月～平成 25 年 3 月

研究者: 高橋 和

1. 研究のねらい

本研究は、フォトリック結晶ナノ共振器を用いて極微小サイズで超省電力動作するシリコンラマンレーザ素子を開発することを最大の目標とした。シリコンラマンレーザは、唯一のシリコンレーザであり、2005年にインテルが発振に成功して大きな注目を集めたデバイスである。しかしながら、実用化に向けた小サイズ化、省エネルギー化がほとんど進まず、当初の期待とは裏腹に産業界に革新的進歩をもたらすことができなかった。この問題点は、本研究開始時点でも解決の目途は、全くたっていないように思われた。

私が開発を目指したデバイスは、インテルのラマンレーザと比べてサイズが4~5桁小さく、閾値も4桁以上低く、PiN構造も必要ないため、高集積・低消費電力・低コスト、光通信波長帯動作・CMOS技術との整合性といった産業上の利点を多く持っていた。そのため、シリコンフォトニクスにおける重要な一里塚になると期待していた。

このような革新的改善を実現するための本研究の戦略の科学的根拠は、物質と光の相互作用が共振器のQ値に比例して体積には反比例するという基本的なものである。研究者は、京都大学のグループとの共同研究により、世界最高Q値を持つナノ共振器の開発に成功しており、世界最高Q値と極微小体積を併せ持つ2次元フォトリック結晶ナノ共振器を用いれば極微小・低閾値ラマンレーザが、理論的には実現可能なはずであった。しかしながら、現実に即した理論研究は存在せず、他グループからの実験報告も一切なく、研究者自身ラマンレーザの研究どころか予備実験すらしていなかった。そのうえ、テニユアトラック講師として独立したばかりで、研究室には一切装置がなかった。

このような背景で、研究者が無謀ともいえる挑戦をしたのは、シリコンフォトニクス研究が、現在のLSIが抱える電気配線ボトルネック問題を解決するための光配線や急速にトラフィック量が増大している光通信ネットワークの高速・省エネ化、医療・バイオ分野まで幅広く行われていたこと。そのなかでもとりわけ困難だったのが、シリコンを用いてレーザを実現することだったからである。研究を成功させることで、日本発祥の高Qナノ共振器で産業界にパラダイムシフトを起こすような革新的デバイスが実現できることを世界に向けて発信することが本研究の狙いであり、モチベーションであった。

2. 研究成果

(1) 概要

電子デバイスとして絶対的な優位性を保つシリコン(Si)は、間接遷移型半導体であるため、レーザ動作や光増幅機能を実現することが困難であり、長年にわたり多くの努力が注ぎ込まれてきた。主に、化合物半導体とのハイブリッド化、ナノ構造の導入、イオン注入など、バンド間遷

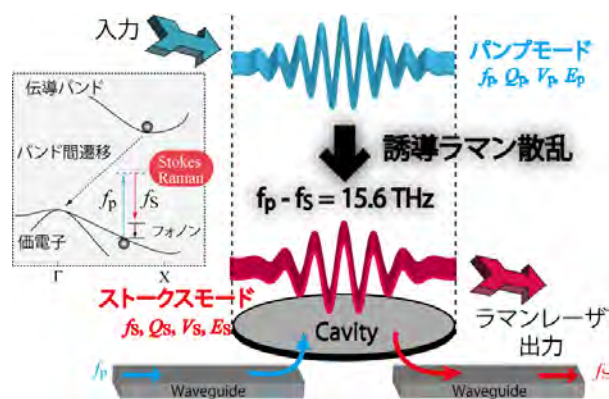


図 1. 高 Q 微小共振器を用いた Si ラマンレーザの概念図. 2つの共振モードが必要となる.

移を用いる手法が試みられてきたが、2002 年、図1に示すような誘導ラマン散乱を用いる光増幅方法が提案され、2005 年、Si リブ型導波路を用いた Si ラマンレーザが開発され大きな注目を集めた。しかし通常、ラマン散乱確率はバンド間遷移確率よりも更に低いため、強励起と長い共振器長が必要となり、このデバイスの小型化・低閾値化は大きく進展しなかった。この問題を解決するためにカギとなるのが、光と物質の相互作用を高めることが可能な高 Q 値微小共振器である。図1は開発デバイスの概念図を示しており、2つの特殊な共振モードを必要とする。これらのモードは Si のラマンシフトと一致した 15.6 THz の周波数差を持ち、可能な限り高い Q 値を持ち、微小体積だけでなく高いラマン散乱確率が得られる電磁界分布を持たねばならない。一般的に共振器体積を小さくしていくと、Q 値が減少してしまい、これらの要求を満足するのが困難になる。そのような中、フォトニック結晶ナノ共振器は微小体積と高 Q 値を併せ持つ稀有な特長を有しており、研究者は、ナノ共振器として世界最高 Q 値数百万を Si を用いて実現していた<研究成果論文 1, プレスリリース1>。

(2) 詳細

ラマンレーザ開発に向けてまず困難と予想されたのは、図1に示した 15.6 THz の周波数差を持つ2つの共振モードをどう選ぶか、特に高エネルギー側のパンプモードにどのようなモードを選択するかという点と、通常でも微弱なラマン散乱光をナノ共振器のような微小デバイスで測定できるかという点であった。この問題を解決するために3つの研究テーマ A-C を研究期間初期に、大阪府立大学の 2 人の学生とともに行った。最後に研究テーマ D を京都大学の学生と行い、インテルのデバイスの 10000 分の1のサイズ、20000 分の1の閾値でレーザ発振を実現した。

研究テーマ A「高 Q ナノ共振器の動作波長の拡大」<研究成果論文 2>

1 つ目のテーマは高 Q ナノ共振器の動作波長の拡大である。近赤外域において微弱なラマン散乱光を測定するには、液体窒素で冷却された InGaAs を検出器に用いるほかないが、この素子の波長感度は 1.58 μm 以下である。それまでの高 Q ナノ共振器は、波長 1.55 μm 付近で実現されていたが、1.55 μm の高 Q 共振モードから放出されるラマン散乱光は波長 1.68 μm となるため検出感度外となる。そのため、動作波長の短波化が必要となる。研究の結果、単なる短波化だけでなく、全ての光通信波長帯 1.25–1.65 μm の範囲で Q 値 100 万以上を持つナノ共振器を実現し、中赤外域においても実現可能であることを明らかにした。さらに、更なる Q 値向

上に重要となる知見を獲得し、それを実行することで Q 値 1000 万に届こうかというナノ共振器の作製にも成功した。この記録は、他グループの最高値の 5 倍に相当する。

研究テーマ B「高 Q ナノ共振器における高エネルギー共振モードの探索」<投稿準備中>

次に、ナノ共振器中に形成される高エネルギー共振モードについて調べた。それまでの高 Q ナノ共振器研究は、最も高い Q 値が得られる基底ナノ共振モードを中心に行われていたが、15.6 THz 離れた高エネルギー領域にたくさんのファブリペロー共振モードと基底モードとは異なるパリティを持つ高 Q ナノ共振モードを発見した。最終的には、後者をラマンレーザの励起モードに採用するのがベストであると判明した。このモード選択が後のラマンレーザ発振を実現する上で最も重要であった。<研究成果論文 4>が受理後、速やかに投稿予定である。

研究テーマ C「高 Q ナノ共振器からのラマン散乱スペクトル測定」<投稿準備中>

最後に、高 Q 値ナノ共振器からのラマン散乱光の測定を、図 2 に示すように 3 桁にわたり異なる Q 値を持つ 4 つのナノ共振器を用いて行った。図 3 に共振器に入射したパワーと測定されたラマン散乱パワーの関係を示す。ラマン散乱光が Q 値に比例して増強される様子が明瞭に測定された。ナノ共振器からのラマン散乱光測定は、2005 年以降、世界中のグループが挑戦したようだが、ことごとく失敗しており、現在でも私以外から成功の報告はない。この研究に関しても <研究成果論文 4>が受理後、速やかに投稿予定である。

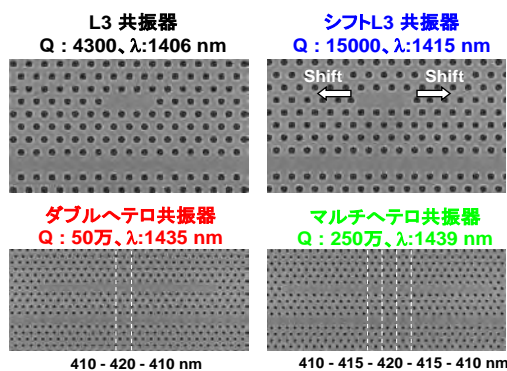


図 2. ラマン測定に用いた 4 つのナノ共振器の SEM 像。それぞれ Q 値が異なる。

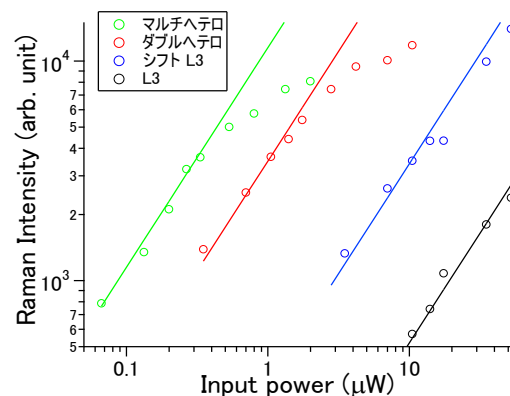


図 3. ラマン散乱強度の励起強度依存性。実線は線形フィッティングを表す。

研究テーマ D「高 Q ナノ共振器シリコンラマンレーザの実現」<論文投稿中>

3 つの研究の集大成として、ラマンレーザ素子の設計を行った。低閾値レーザ発振のためには、図 1 に示した 2 つの共振モードは、周波数 (f_p, f_s), Q 値 (Q_p, Q_s), 体積 (V_p, V_s), 電磁界分布 (E_p, E_s) それぞれにおいて、様々な特長を有さねばならない。①両者の周波数差は 15.6 THz に一致すること, ②なるべく高い Q 値を持つこと, ③なるべく小さい体積を持つこと, ④シリコンのラマン選択則に従い高いラマン遷移確率を持つ電磁界分布の組み合わせであること, の計 4 つである。この厳しい条件がナノ共振器ラマンレーザの研究進展を絶望的に妨げてきた。しかも、どの程度満たせば発振するのかは、理論計算からは不明瞭で、結局のところ作って測ってみるしかないのが実際であった。

図 2 に示した共振器の中から、最も高い Q 値が得られるマルチヘテロ構造ナノ共振器を採用した。図 4 が設計したデバイスの構造とバンド図を示している。これまで、ナノ共振器研究では、最も高い Q 値が得られる Even のパリティを持つ基底ナノ共振モードだけが注目を浴びてきた。しかし我々は、Odd のパリティを持つナノ共振モードもヘテロ構造共振器には形成され、か

つこのモードも 10 万以上の高 Q 値が得られることを、先述の研究テーマ B で発見していた。さらにこのモードは、基底共振モードからの周波数差が 15.6 THz に近く、周波数差制御も容易であることが分かった。また同一のヘテロ構造で閉じ込められるため、空間重なりも高くなることが期待できる。さらに、2 つの共振モードの空間対称性から、ナノ共振器を $\langle 100 \rangle$ SOI 基板の $[100]$ 方向に作製すると、高いラマン遷移確率が得られることを発見した。

最終的にこのデバイスを作製したところ、図5に示すように、超低閾値でレーザー発振が達成された。この成果は光学の歴史のなかでも、重要な一里塚とみなせる成果であり、わずか数名の研究グループで実現したことに、我ながら驚嘆する。なお、本研究を遂行するにあたり、京都大学野田進教授より大変な援助をしていただいた。ここに深く感謝いたします。

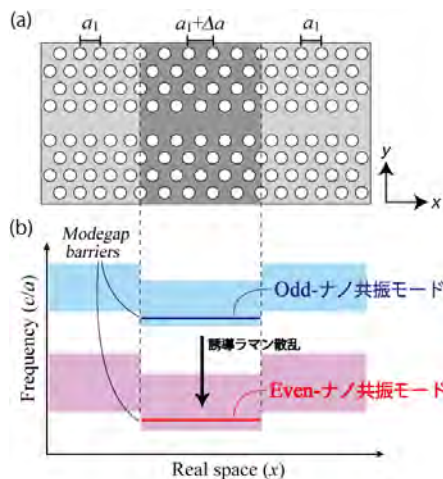


図 4. ラマンレーザに用いたナノ共振器構造(a)とそのバンド構造(b)。2つの高 Q ナノ共振モードをレーザ発振に用いている。

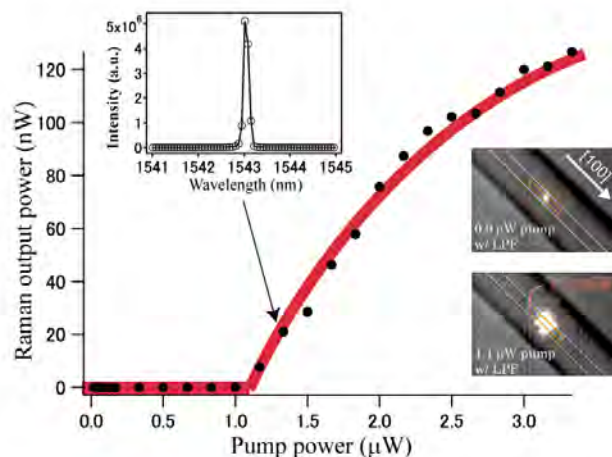


図 5. ラマンレーザの入力-出力特性。挿入図は発振スペクトルと発振前後における長波長透過フィルターを通したナノ共振器の赤外カメラ像である。

3. 今後の展開

ラマンレーザの低閾値化、高効率化を推し進め、波長変換効率 50%以上を達成する。また、1270nm-1650nm の光通信波長帯全てにおいて、ラマンレーザ発振を実現する。さらに、今回の成果を生かして、導波路構造における誘導ラマン増幅器の開発を行う。

4. 自己評価

研究タイトルともなっているラマンレーザの連続発振を達成できたことで、80%以上の達成率を実感している。閾値とサイズはインテルの開発したデバイスの 1 万分の1から10万分の1である。PiN 構造も必要としないため、作製コストも低く、真のシリコンレーザと呼べるデバイスだと思う。科学者として歴史的な偉業を成し遂げた達成感はある。一方で、達成した成果の大きさに比べて論文数が少ないことと、この成果を生かした発展的研究を行う時間がとれなかったこと、特許戦略をほとんど練れなかったことが反省材料として残るが、これは若手研究者の待遇問題とも密接に関係しており、半分以上は仕方のないこととあきらめている。

5. 研究総括の見解

高橋研究者は、京大野田研在籍中に、世界最高の Q 値 200 万を達成したシリコンフォトニッ

ク結晶の専門家です。彼は、大阪府大に新しく研究室を立ち上げるに当たって、得意のフォトニック結晶技術を活かして超小型シリコンラマンレーザーの実現を図ることを提案しました。

シリコン集積回路の大規模化・高機能化にともないメタル配線での信号遅延が深刻化しています。この解決手段として、光電子集積回路が注目されていますが、シリコンは間接遷移型半導体であるため、レーザ動作や光増幅機能を実現することが困難であり、化合物半導体とのハイブリッドが模索されてきました。ところが、2002年になってインテルの研究者が誘導ラマン散乱を用いる光増幅方法を提案し、2005年 Si リブ型導波路を用いた Si ラマンレーザーを開発したことで、にわかにシリコンフォトニクスが現実味を帯びてきましたが、サイズが大きく集積化にはほど遠いものでした。

高橋研究者は、Q 値の高いフォトニック結晶をナノサイズ共振器として用いることで、ラマンレーザーが実現できるのではないかと考えました。このためには、Si のラマンシフトと一致した 15.6 THz の周波数差を持ち、可能な限り高い Q 値を持ち、微小体積だけでなく高いラマン散乱確率が得られる電磁界分布を持つ2つの共振器を隣接して作りこまなければなりません。彼は、入射側には奇パリティの電磁界分布を有し、出射(ストークス光)側には偶パリティの電磁界分布を有する場合に、強い結合が生じてラマンレーザーが実現することを電磁界計算から予測し、出身研究室のプロセス技術の支援を受け、このためのフォトニック結晶構造を作製しました。

この結果、周波数差が 15.6 THz に一致していないものでも、線幅が 0.7 nm の自然ラマン散乱によるピークと偶パリティのナノ共振モードとの共鳴を経て放出された狭い線幅の強いピークが初めて同時に観測され、ラマン散乱増強が確認されました。さらに、周波数差 15.65 THz を持つナノ共振器では、 10^{-5} という高いラマン散乱効率が得られ、励起強度依存性を調べたところ、僅かではあるが、共鳴ラマンピークの非線形な増強が確認され、初めて誘導ラマン散乱の兆候を捉えることに成功しました。なお最新の成果(非公開で)は、シリコン光配線に非常に大きな革新をもたらすもので、発表すれば世界的に大きなインパクトを与えると期待されます。

6. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Yuki Taguchi, Yasushi Takahashi, Yoshiya, Sato, Takashi Asano, and Susumu Noda 「Statistical studies of photonic heterostructure nanocavities with an average Q factor of three million」 Optics Express 19, 11916–11921 (2011).
2. Ryo Terawaki, Yasushi Takahashi, Masahiro Chihara, Yoshitaka Inui, and Susumu Noda 「Ultrahigh-Q photonic crystal nanocavities in wide optical telecommunication bands」 Optics Express 20, 22743–22752 (2012).
3. Yoshiya Sato, Yoshinori Tanaka, Jeremy Upham, Yasushi Takahashi, Takashi Asano, and Susumu Noda 「Strong coupling between distant photonic nanocavities and its dynamic control」 Nature Photonics 6 56–60 (2012)
4. Yasushi Takahashi, Yoshitaka Inui, Masahiro Chihara, Takashi Asano, Ryo Terawaki, and Susumu Noda

5.「A μm -sized, μW -threshold Raman silicon laser」
投稿中

(2)特許出願

研究期間累積件数:1 件

1.

発 明 者: 高橋和, 千原賢大, 乾善貴, 浅野卓, 野田進

発明の名称: ラマン散乱光増強デバイス, ラマン散乱光増強デバイスの製造方法

出 願 人: JST

出 願 日: 2012/8/24

(3)その他の成果(主要な学会発表, 受賞, 著作物, プレスリリース等)

1. プレスリリース「光ナノ共振器を高度化 -Q値記録を更新-」, 2009/12/28, 日刊工業新聞.
2. 招待講演「高Qフォトニック結晶Si ナノ共振器の光デバイス応用」, 2010/1/20 日本光学会 関西講演会
3. 著作物「フォトニック結晶ナノ共振器のQ値増大と波長制御」, 機能材料 5 月号(2011), シーエムシー出版.
4. 招待講演「Enhanced Raman Scattering in Silicon High-Q Photonic Crystal Nanocavities」, 2012/9/10, OPU-KIST-ECUST Joint Symposium