



超小型・超低閾値ラマンシリコンレーザーの実現

実用的なシリコンレーザーの開発を目指して

高橋 和

大阪府立大学 21世紀科学研究機構
特別講師

研究の背景

豊富な資源量、極限まで集積化が進んだCMOS技術など、電子デバイスの中心材料であるシリコンを用いて光デバイスも作ることができれば、電子機器や光通信ネットワークの高速・省エネ化だけでなく、医療・バイオ分野までその恩恵が行きわたると期待されている。導波路、分波器、変調器、受光器など個々には良好な性能を持つシリコン光素子がいくつも実現してきており、パソコンなどのCPUに光技術が導入されるのも時間の問題となりつつある。しかしながら、シリコンは間接遷移型と呼ばれるタイプの半導体であり、光技術の源泉であるレーザー光を生み出すことが物理的に困難である。現在、我々の暮らしの中に無数に存在している半導体レーザーやLEDのほぼ全てが、13族と15族の6つの元素(アルミ、ガリウム、インジ

ウム、窒素、リン、ヒ素)を組み合わせられており、これらはシリコンとの相性が良いとはいえない。電子技術と光技術の真の融合を図るためには、実用的なシリコンレーザーを作ることが重要である。

現在唯一のシリコンレーザーは、ラマン散乱現象を利用した光励起型のレーザーである。ラマン散乱は1928年に確認された現象で、透明な物質に光を照射すると、照射した波長から物質の格子振動数だけ長波長にシフトした光が放出されるものである。この光現象は、レーザーの源となる誘導放出も可能であり、2005年にインテル社が初めて室温連続発振するラマンシリコンレーザーを発表して注目された。しかし素子サイズが1センチ以上もあり、発振閾値も20ミリワットと非常に高かった。さらに、P-i-Nダイオードを付加した作製コストの高い構造であった。これではシリコンを用いるメリットが減少してしまう。

研究の成果

受賞者は、2006年からフォトニック結晶ナノ共振器のQ値向上に取り組み、世界最高Q値を更新しつづけてきた[1-4]。この成果を何とか革新的デバイスの創生につなげたいと考え、フォトニック結晶高Q値ナノ共振器におけるラマン散乱の増強メカニズムを調べてきた。精緻な試料作製と顕微分光測定を駆使して地道な研究を積み重ねた結果[5-7]、2013年、インテルのデバイスより1万倍以上小さく、2万倍低い閾値を持つラマンシリコンレーザーを開発した[8]。

図1がレーザーに用いたナノ共振器の構造とラマン散乱のメカニズムを示している。フォトニック結晶は、薄いシリコンの板にナノメートルサイズの空気孔を周期的に開けて形成されており、空気孔の格子定数(a)が僅かに大きくしてあるヘテロ構造部分で、局所的に光を強く閉じ込めるためのナノ共振モードが2つ形成される。我々は、第2ナノ共振モードを励起光を閉じ込めるために、第1ナノ共振モードをラマン散乱光を閉じ込めるために利用した。前者の共振モードはQ値10万以上、後者では100万以上が得られ、両者の周波数差は空気孔の直径を変えることでシリコンの格子振動数に一致させることが可能という特長を持っている。

図2は作成したサンプルの電子顕微鏡写真にラマンレーザーの動作イメージを重ねたものである。P-i-Nダイオード構造は付けておらず、純粋にシリコンだけで作られている。空気孔を埋めた3本の線欠陥が平行に構築しており、長さが10マイクロメートル程度の中央の欠陥がヘテロ構造ナノ共振器である。通常、シリコン光素子は[110]方向(紙面

図1 (a) ラマンレーザーに用いたナノ共振器の構造とバンド図 (b) シリコンのバンド図と発光現象

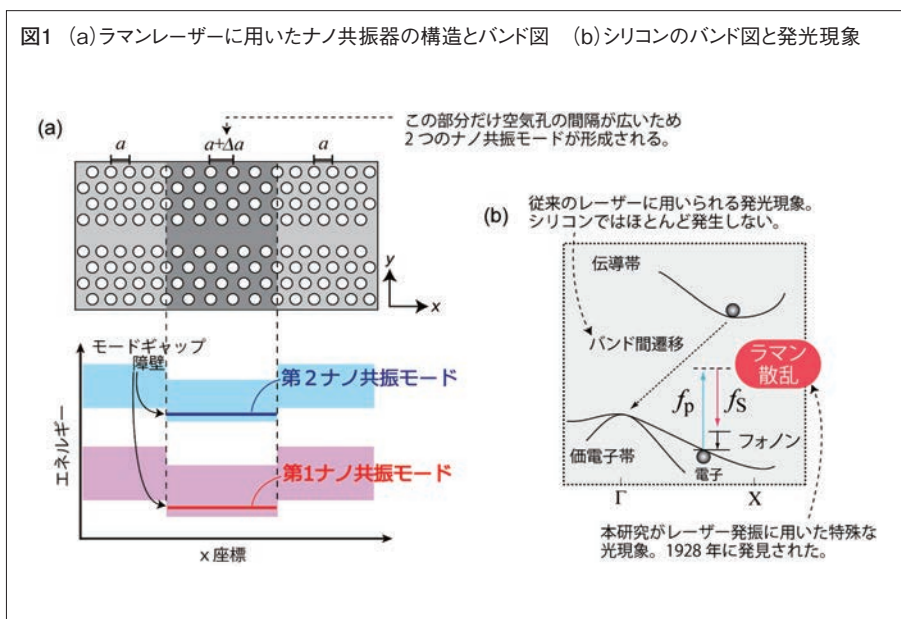
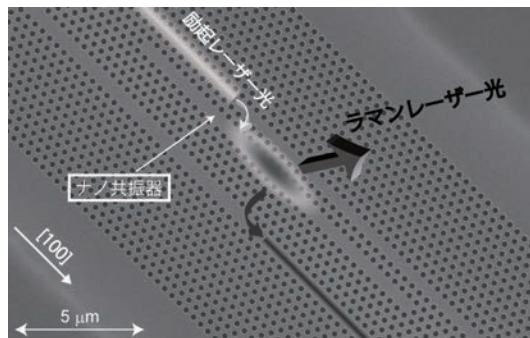


図2 ラマンシリコンレーザーの電子顕微鏡写真とデバイスの動作イメージ



水平方向)に作製されるが、2つのナノ共振モードの電磁界分布とシリコンのラマン選択則を考慮すると45°傾いた[100]方向に作製したほうがレーザー発振に有利となる。

発振メカニズムを簡単に言うと、以下のとおりである。①Q値が10万程度の第2ナノ共振モードに閉じ込められた励起光はシリコンの格子振動と相互作用してラマン散乱光を効率的に発生させる。②生じたラマン散乱光はQ値100万以上の第1ナノ共振モードにさらに強く閉じ込められる。

③[100]方向に共振器を作製したことで両モードは強く結合して、ラマン散乱が増幅されレーザー発振が起こる。

図3は、ナノ共振器から垂直方向に放射されたレーザー光の強度をプロットした結果と発振前後での共振器の赤外カメラ写真である。約1マイクロワットの入射強度で明瞭なレーザー発振が確認されていることが分かる。本測定は大気中にて行われたが、バルクシリコンのみをレーザー発振の材料に用いていることから堅牢であり、測定を

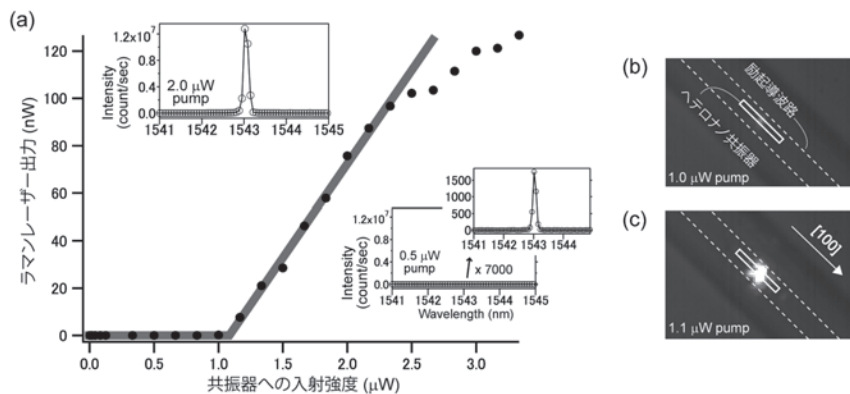
繰り返すことによる性能劣化は見られていない。

将来の展望

本デバイスの閾値をさらに下げることが十分可能であり、ナノワットレベルの励起強度であれば、シリコンからの自然放光でもレーザーの励起源として利用可能と期待される。つまりシリコンLEDからの発光を介したより実用的な電流注入型のラマンシリコンレーザーが期待できる。もし実現すれば、電子技術と光技術が融合した夢のシリコンチップへの道が大きく開かれることとなる。また、安価な小型センサー光源として、さまざまな産業創出を可能とするだろう。今回我々が発明したデバイスコンセプトは、フォトリソニック結晶導波路にも適用可能であり、光増幅器の開発までが今後の研究ターゲットになると予想される。ぜひ、このような研究に今後チャレンジしていきたいと考えている。本研究が、シリコンフォトリソニックと我が国の電子産業の発展に寄与することになれば大きな喜びである。

本研究の遂行にあたり京都大学野田進教授には全面的に協力していただいた。共同研究者の皆さまに深く感謝申し上げます。

図3 (a)レーザーの入力出力特性。挿入図は発振前後での出力スペクトル (b)、(c)発振直前と直後のナノ共振器の赤外カメラ写真



補足説明

Q値

共振器が光を閉じ込める強さを表す量。Q値が高い共振器は、光を長く閉じ込めることができるので、光と物質の相互作用を高めることが可能となる。英語のQualityの頭文字に由来している。

ヘテロ構造ナノ共振器

2005年に報告された構造で、非常に高いQ値を持つことを特徴とする。格子定数を少し大きくしたことによるモードギャップ障壁を利用して光を閉じ込めている。

References(参考文献)

- [1] Y. Takahashi, H. Hagino, Y. Tanaka, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda, "High-Q nanocavity with a 2-ns photon lifetime," Opt. Express 15, 17206(2007).
- [2] H. Hagino, Y. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, "Effects of fluctuation in air hole radii and positions on optical characteristics in photonic crystal heterostructure nanocavities," Phys. Rev. B 79, 085112(2009).
- [3] Y. Taguchi, Y. Takahashi, Y. Sato, T. Asano, and S. Noda, "Statistical studies of photonic heterostructure nanocavities with an average Q factor of three million," Opt. Express 19, 11916(2011).
- [4] H. Sekoguchi, Y. Takahashi, T. Asano, and S. Noda, "Photonic crystal nanocavity with a Q-factor of ~9 million," Opt. Express 22, 916(2014).
- [5] Y. Takahashi, Y. Tanaka, H. Hagino, T. Asano, and S. Noda, "Higher-order resonant modes in a photonic heterostructure nanocavity," Appl. Phys. Lett. 92, 241910(2008).
- [6] 乾善貴, 高橋和, 浅野卓, 野田進, "ナノ共振器シリコンラマンレーザーの特性に結晶方位が与える影響", 秋季応用物理学会 14p-B1-6(2012).
- [7] Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, "High-Q resonant modes in a photonic crystal heterostructure nanocavity and applicability to a Raman silicon laser," Phys. Rev. B 88, 235313(2013).
- [8] Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, "A micrometre-sized Raman silicon laser with a microwatt threshold," Nature 498, 470(2013).