

プレスリリース

2015年6月25日

国立大学法人東京大学 ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構

世界最小量子ドットレーザの室温動作に成功

～高効率ナノレーザの実用化に弾み～

< 1. 概要 >

国立大学法人東京大学（総長：五神真）ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構（機構長：荒川泰彦＝生産技術研究所教授）の荒川泰彦教授、館林潤特任助教らは、このほど、高効率ナノレーザ^{注1}として、ナノワイヤ^{注2}量子ドット^{注3}レーザの室温（300K(ケルビン)=27度C）動作に世界で初めて成功しました。このレーザは、世界最小体積の量子ドットレーザであり、直径290nm（ナノメートル）、長さ4.3μm（マイクロメートル）の半導体ナノワイヤ中に50層積層された量子ドットの光利得と、単一のナノワイヤの両端をミラーとした共振器構造を用いて実現されました。今回の室温発振の達成は、結晶成長の高度な精密制御技術と先端的レーザ設計手法を駆使したことによるものです。さらに、半導体レーザの性能指標である特性温度^{注4}でも133Kとナノワイヤレーザとして最高値を実現し、量子ドットによる性能向上を裏付けました。今回の成功により、量子ドット本来の超低消費電力・高温安定性等を備えた超小型・高性能なナノレーザの高密度集積化が可能となり、シリコンフォトニクス分野の光電子融合集積回路^{注5}への実装や環境・生体分野への応用開拓も図れるものと期待されます。

本研究は文部科学省・イノベーションシステム整備事業・先端融合領域イノベーション創出拠点の形成「ナノ量子情報エレクトロニクス連携研究拠点」、内閣府・最先端研究開発支援プログラム（FIRST）「フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発」、経済産業省・未来開拓研究プロジェクト、及び新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術」の支援で行われました。

今回の成果論文はNature Photonics 2015年6月29日（英国時間、＝日本時間6月30日）付オンライン版に先行公開されます。

< 2. 研究の背景 >

クラウド・コンピューティングの進展などにより、データセンタ等における情報処理の大規模化が進み、情報処理量や通信トラフィックが指数関数的に増大しており、ルータ、サーバ等の情報処理機

器の電力消費の低減や処理性能の向上が大きな課題となっております。これまで情報機器は半導体回路の微細化を進めることで、低消費電力化や小型・高機能化といったニーズに対応してきましたが、近年、電気配線の限界が指摘され、現状の電気信号による信号伝送に代わって光で信号転送するための超小型光電子融合集積回路の研究が活発に進められています。シリコン基板上に微細な光導波路や光スイッチ、光増幅器などの光デバイスと電子デバイスを融合した光電子融合集積回路の実現が現在、世界的にも進展していますが、こうした光電子融合集積回路基板に直接実装可能なナノレーザ光源の研究開発が大きな課題となっております。

中でもナノワイヤレーザは直径が数百 nm、長さが数～数十 μm の半導体ナノワイヤ構造で構成されており、ナノワイヤ両端を共振器ミラーに用いています。そのため、従来の半導体レーザと同様の動作原理ながら、1 万から 10 万分の 1 の非常に小さい体積でレーザ発振が可能となり、また出力光の方向・形状が容易に制御できるため、マイクロオーダーの大きさを持つ光電子融合集積回路へオンチップで実装することが可能です。また人の髪の毛と比して 100 から 1000 分の 1 程度に小さい（体積比）ことから生体・環境分野でのセンシング応用への有用性も持っています。

これまで様々な材料系でナノワイヤレーザのレーザ発振が報告されていますが、それらの報告の殆どがバルク材料の光利得を用いており、今回は究極的な量子閉じ込め構造を持つ量子ドットを活性層に持つナノワイヤレーザ（ナノワイヤ量子ドットレーザと呼ぶ）の室温動作を実現した最初の報告となります。

我々のグループは、GaAs（砒化ガリウム）系ナノワイヤ量子ドットレーザの開発に取り組み、2012 年には単一ナノワイヤ中に単一の量子ドット構造を実現し単一光子発生過程を観測するとともに、2014 年には均一性や品質を損ねることなく量子ドット構造をナノワイヤ中に積層する結晶成長技術を開発してきました。今回、これらの結晶成長技術を元にナノワイヤ量子ドットレーザ構造を作製し、共振器構造の最適化を行うことにより今回室温でのレーザ発振に成功したものです。これにより量子ドットを用いた高効率ナノレーザへの展開が期待されます。

< 3. 開発した技術の特徴 >

以下に今回、実現した技術の特徴を示します。

a) 量子ドットの積層化・高均一化をナノワイヤ中で実現

ナノワイヤ中に量子ドットを積層するためには、高品質・高均一なナノワイヤが必須となります。詳細な実験・解析に基づいて有機金属気相成長法（MOCVD）^{注6}による GaAs ナノワイヤの選択成長技術を確立しました。

そのうえで成長したナノワイヤ中に InGaAs（ヒ化インジウムガリウム）/GaAs 多層ヘテロ構造を成長することにより積層量子ドット（高さ 7nm、幅 45nm、積層数 50）を形成し、さらに GaAs/AlGaAs（ヒ化アルミニウムガリウム）/GaAs コアシェル構造^{注7}で被覆し、量子ドットを埋め込んだナノワイヤ構造としました（図 1、2）。

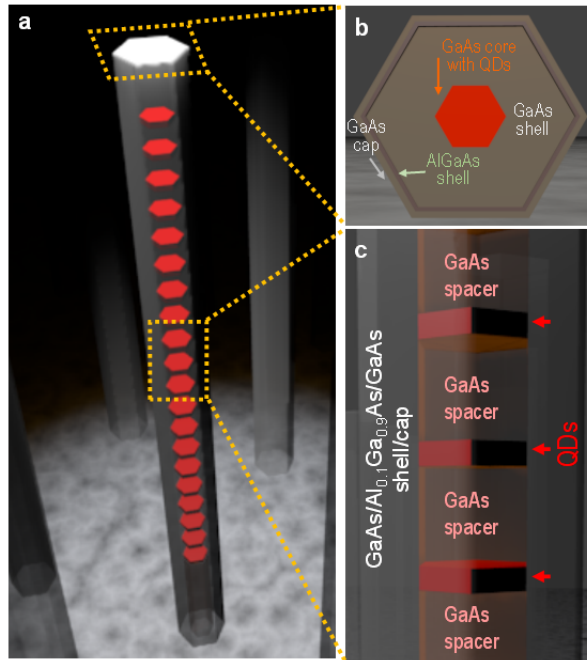


図 1. InGaAs/GaAs 量子ドットを埋め込んだナノワイヤの概念図 (a は全体図、b は水平断面図、c は垂直断面図)

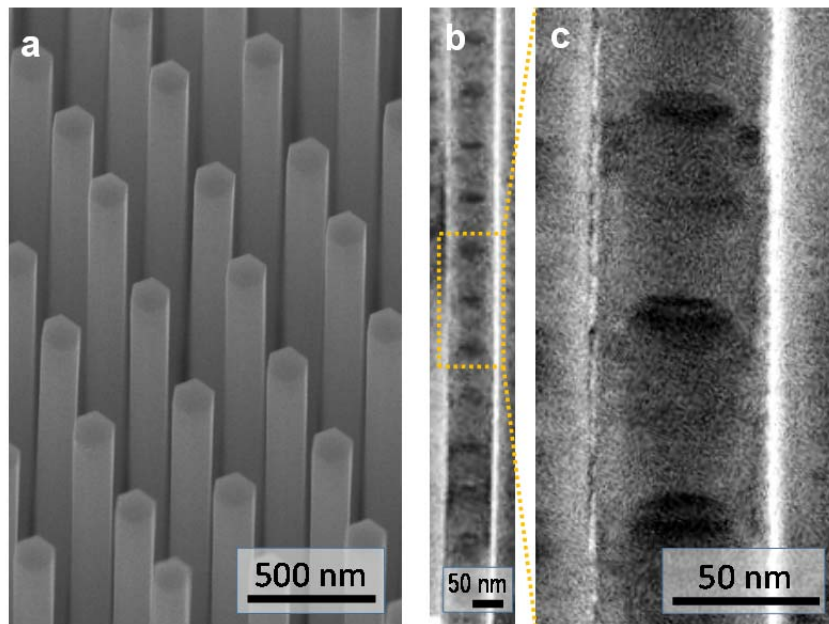


図 2. InGaAs/GaAs 量子ドットを埋め込んだナノワイヤ (a は走査電子顕微鏡像、b, c は断面電子透過顕微鏡像)

これらの構造は先端的レーザ設計手法に基づいた選択成長で実現しました。具体的には個々の量子ドットの発光エネルギーを揃えることにより均一性の改善を図り、コアシェル構造を導入することによりキャリアの量子ドット発光層への効率的な閉じ込めを実現した結果、室温でも十分な発光を得ることに成功したものです。

b) ナノワイヤ量子ドットレーザの光励起による室温発振を実現

開発したナノワイヤ量子ドットレーザのデバイス評価の結果、光励起による室温発振を世界で初めて実現しました（図3）。デバイス性能の指標である特性温度は133Kと、従来のナノワイヤレーザの最高値（ $\approx 109\text{K}$ ）と比べても高い値を得られています。これは量子ドット導入によりキャリアの効率的な閉じ込めが起きていることを示唆するものです。

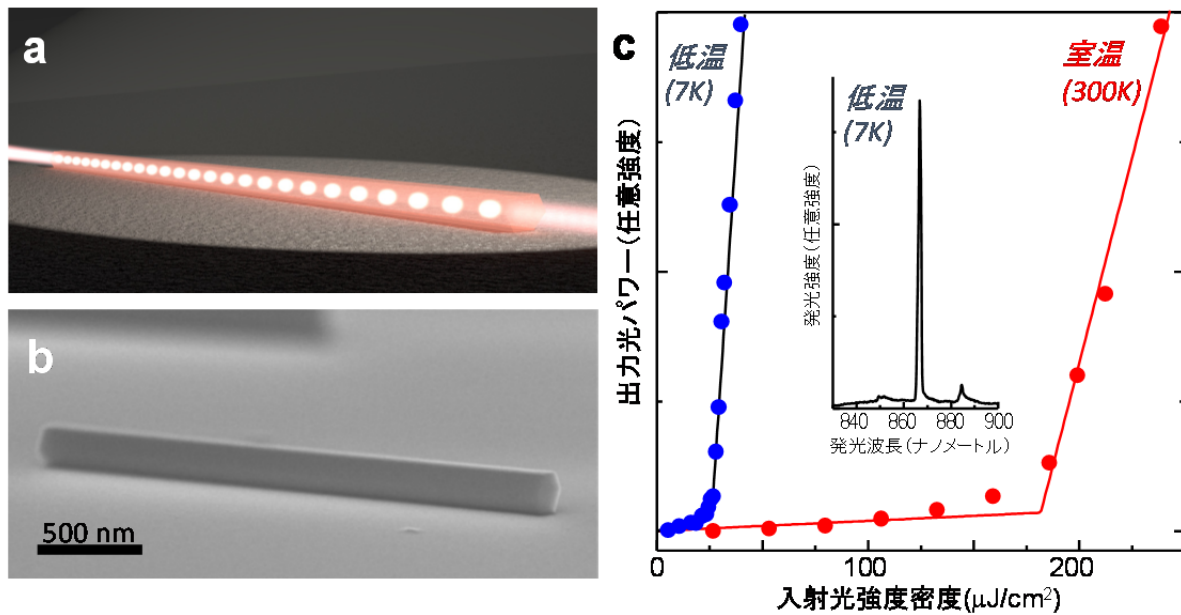


図3. ナノワイヤ量子ドットレーザの室温（300K）における実験データ。aはナノワイヤ量子ドットレーザの概念図、bはナノワイヤ量子ドットレーザの走査電子顕微鏡図、cは光入出力パワーのグラフ、出力光パワーの急激な増大が見られる。挿図は発振スペクトルの1例（7K）

<4. 今後の展開>

ナノワイヤレーザに量子ドット構造を導入し室温発振が実現したことで、今後、ナノレーザ光源の高性能（低閾値・高温度安定性）・多機能（波長制御性）化が見込めるため、成長・プロセス・評価技術の深化による更なる低閾値動作化や長波長化、更には実用化に向け電流駆動によるレーザ発振動作を目指します。シリコンフォトニクス分野の光集積回路への集積・実装に留まらず、今後のナノフォトニクスや環境・生体といった様々な分野の発展に貢献できるものと期待されます。なお、今後、本成果については、NEDOプロジェクトにおける研究開発等において、その展開を図る予定です。

注説明

注1：ナノレーザ

少なくとも一辺の寸法がナノオーダーサイズの半導体レーザ。他の例としてフォトニック結晶レーザやマイクロディスクレーザがあり、我々は既にこれらのレーザ構造へ量子ドットを導入しレーザ発振に成功している。

注2：ナノワイヤ

ナノスケールの直径を持つ1次元の半導体細線構造。様々な材料系でナノワイヤが試作され、そのナノワイヤレー

ザのレーザー発振も報告されているが、そのほとんどは母材（バルク）によるもの。なお、ナノワイヤの形状は、六角形の鉛筆の寸法を数万分の1にしたものに対応。

注 3：量子ドット

電子を3方向から0次元に閉じ込めることができる数10ナノメートルの粒状構造。この微結晶に電子を閉じ込めると、電子のエネルギー状態が原子核と同様に飛び飛びの離散状態をとる。これまでレーザーや光増幅素子、単一光子源などに応用されている。量子ドット概念は1982年に荒川泰彦教授、榊裕之名誉教授が提案した。

注 4：特性温度

半導体レーザーのデバイス特性における重要な指標の一つ。この値が高いほど動作閾値の温度依存性が低いことを意味している。一般に量子閉じ込め構造の次元が上がるほどこの値は高くなり、量子ドットを用いると無限大（温度無依存）になることが荒川泰彦教授、榊裕之名誉教授により理論的に示されている。

注 5：光電子融合集積回路

光導波路、光スイッチ、光変調器、光アイソレータ、受光器などの光学回路と電子素子をシリコン基板上に集積した回路。光源の半導体レーザーも、発光効率の高い化合物半導体レーザーをハイブリッド実装することが検討され、ナノワイヤレーザーなどの小型・高性能化が一層求められている。

注 6：MOCVD（有機金属気相成長）

原料として有機金属を用いた結晶成長方法、又はその装置。化合物半導体を結晶成長するために用い、膜厚や組成の制御性に優れる。予め開口パターンを用意したマスク基板を用いることにより、選択的な成長もできる。

注 7：コアシェル構造

2種類の材料種の一方が核（コア）を形成し、もう一方がその周囲を取り囲んだ（シェル）構造のこと。

【本研究に関するお問い合わせ先】

東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 機構長：荒川泰彦

電話：03-5452-6245（教授室） E-mail: arakawa@iis.u-tokyo.ac.jp