

報道機関 各位

国立大学法人 電気通信大学

## 世界最高密度の量子ドットを導入した半導体レーザを開発

### 【ポイント】

- \* 世界最高の量子ドット密度を実現し、低内部損失で高利得の量子ドットレーザを開発した
- \* 量子ドットの超高密度化により、少ない量子ドット積層数、短い共振器長、高反射ミラーコートのない構造で比較的高温で安定したレーザ発振に成功
- \* 本技術を基にしたさらなる量子ドットの高均一化により、超低消費電力化、超高速変調の量子ドットレーザの実現が期待される

### 【概要】

電気通信大学大学院情報理工学研究科の山口浩一教授らの研究グループは、世界最高の量子ドット<sup>[1]</sup>密度を実現し、低内部損失で高利得<sup>[2]</sup>の量子ドットレーザを開発しました。

量子ドットを半導体レーザに導入する研究開発は活発に進められています。従来の量子ドットは面内密度が低く、均一性も十分でないために、量子ドット層を多数積層した構造が不可欠でした。また、共振器の幅を長くしたうえで、端面には高反射ミラーのコーティング膜を形成する必要がありました。

本研究では、量子ドット密度が従来比 10 倍以上の世界最高密度化に成功し、半導体レーザの活性層に導入しました。従来の量子ドットレーザは、光学利得を増やすために量子ドット層の多数積層化（10 層程度）、長い共振器長（数 mm）、高反射ミラーのコーティング膜が必要だったのに対し、今回はわずか 2 層の導入で、共振器長も短く（200 $\mu$ m 程度）、高反射ミラーのコーティング膜も施さない構造であるにも関わらず、比較的高い温度において安定したレーザ光の発振に成功しました。

今後、この面内超高密度量子ドットの高均一化がより進むと、超低消費電力でかつ超高速変調、さらなる高温動作が可能な量子ドットレーザの実現が期待されます。

成果は応用物理学会発行の英文論文誌「Applied Physics Express」に掲載されました。

### 【背景】

半導体量子ドットは、持続的な高度情報化社会を支える革新的な光電子デバイスの構成要素として期待されています。そのためには高密度で高均一な量子ドットの作製技術の確立が不可欠であり、これまでさまざまな作製技術が開発されてきました。

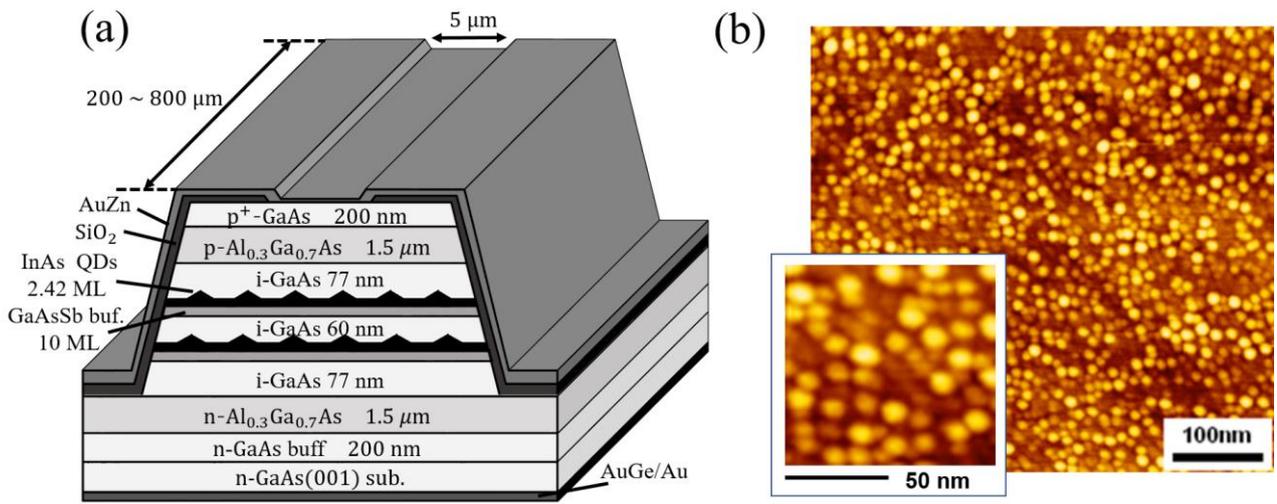
半導体量子ドットの自己形成法としては、Stranski-Krastanov (SK) 成長モードを利用したヘテロエピタキシャル成長がよく用いられています。SK 成長モードでは、基板結晶とエピタキシャル成長<sup>[3]</sup>結晶との格子不整合量による格子歪エネルギーと結晶安定化のエネルギーバランスにより、2次元成長から3次元成長へと遷移します。その成長過程において、転位を抑制した良質な3次元島構造を量子ドットとして自然形成させる手法です。

しかし、SK 成長モードによる量子ドット構造の自己形成においては、基板表面上にランダムに

3次元の島成長が起こるために、一般には基板面内における3次元島構造は不均一になります。つまり、1次元の量子井戸構造<sup>[4]</sup>のように、成長時間による制御だけではアンサンブル量子ドットの全体における高均一化は極めて困難でした。

**【手法】**

従来の量子ドットレーザの活性層には、量子ドットの面密度がそれほど高くないために、量子ドット層を5層以上積層した構造を導入していました。これに対して本研究では、分子線エピタキシー（MBE）<sup>[5]</sup>により、GaAsSb/GaAs層上の面内超高密度InAs量子ドット層を2層だけ活性層に導入したリッジ導波路型の量子ドットレーザを試作しました。



(a) 面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入したリッジ導波路型レーザの断面概形図

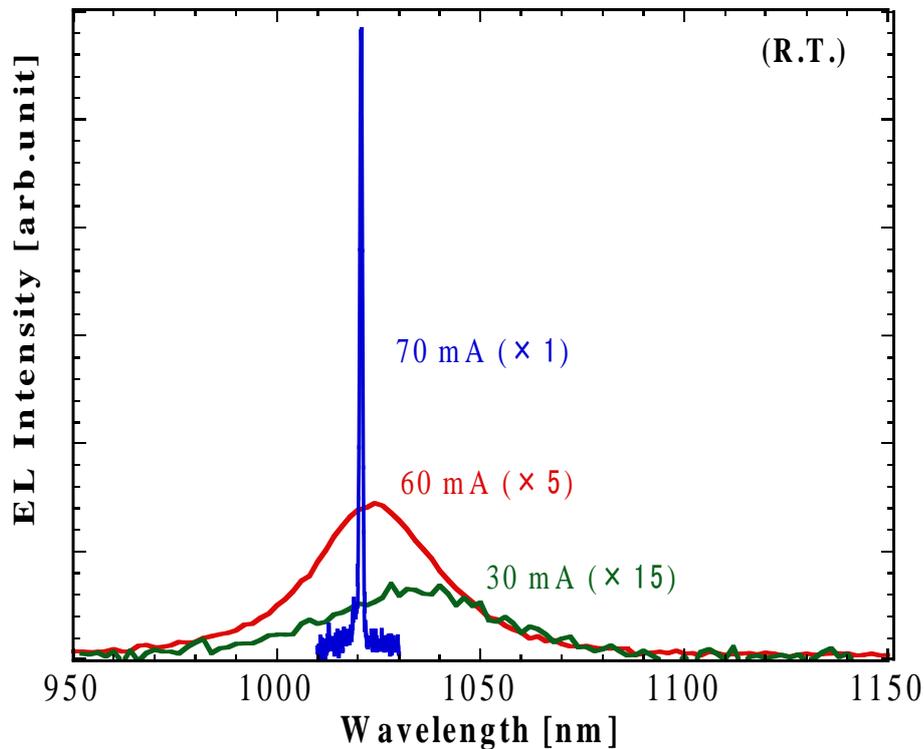
(b) GaAsSb/GaAs 層上の InAs 量子ドットの原子間力顕微鏡写真

**【成果】**

従来の量子ドットレーザは共振器長が1000 μm程度以上と長く、しかも高反射率(HR)のコーティング膜を施した低共振器損失の構造で作製されていました。今回開発した面内超高密度量子ドットレーザは、HR膜のない、短い共振器長(200 μm)においても室温でレーザ発振が確認できました。

室温での発光スペクトルを次の図に示します。注入電流がしきい電流の65 mAを超えた時に、波長1020 nmのレーザ発振が確認できました。短共振器長の高ミラー損失にも関わらず、室温で安定したレーザ発振が得られたのは、高い量子ドット密度(総ドット密度  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ )により高利得が達成されたためだと考えられます。

また、面内超高密度の量子ドット層であることから、注入キャリアの量子ドットへの取り込み率が高く、かつ量子ドット間の面内結合によって低エネルギー量子ドットへのキャリア注入の効率が高くなることも期待されます。



面内超高密度量子ドットレーザの室温における発光スペクトル  
(注入電流: 30mA、60mA、70mA)

### 【今後の期待】

量子ドットの超高密度化により、少ない量子ドット積層数、短い共振器長、高反射ミラーコートのない構造で安定したレーザ発振に成功しました。本技術を基にして量子ドットのさらなる高均一化を進めることで、超低消費電力化、超高速変調の量子ドットレーザの実現が期待されます。

### (論文情報)

雑誌名: 「Applied Physics Express」 Vol. 14, (2021) pp. 124002 1-4.

論文タイトル: InAs/GaAsSb in-plane ultrahigh-density quantum dot lasers

著者: Motoyuki Tanaka, Keichiro Banba, Tomah Sogabe, Koichi Yamaguchi

DOI 番号: 10.35848/1882-0786/ac3542

### (用語説明)

[1] 量子ドット: 電子の波長以下であるナノメートルサイズ (ナノは10億分の1) の微小な3次元半導体結晶中に電子を閉じ込めた構造で、原子内の電子のような電子状態を示すことから、人工原子とも呼ばれている

[2] 高利得: 半導体レーザにおける利得とは、半導体レーザ共振器内の単位長さあたりに生成される光子 (フォトン) の個数で、レーザ光の発振のためには高い利得が必要となる。

[3] エピタキシャル成長: 単結晶の基板の上に、基板結晶の周期性を維持するように単結晶の薄膜を

## 結晶成長させること

[4] 量子井戸構造：電子の波長以下の領域に電子を閉じ込めた構造で、その閉じ込め方向についての電子のエネルギー準位が離散的になる。これを量子閉じ込め効果といい、3次元の量子閉じ込め効果を有する構造が量子ドット

[5] 分子線エピタキシー (MBE)：超高真空の容器内で高純度の原料を加熱して分子線状に噴出させ、加熱された基板表面上に照射し、単結晶薄膜をエピタキシャル成長させる方法。原子層レベルでの膜厚の制御が可能な精密な成長法である

### 【連絡先】

<研究内容に関すること>

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻  
教授 山口浩一  
Tel : 042-443-5149 E-Mail : koyamaguchi@uec.ac.jp

<報道に関すること>

電気通信大学 総務企画課 広報係  
Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887  
E-Mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp