

有機金属気相成長法を用いた 光通信波長帯量子ドットレーザの開発

Quantum Dot Lasers for Optical Communication Grown by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition

橋本 玲

■ HASHIMOTO Rei

櫛部 光弘

■ KUSHIBE Mitsuhiro

江崎 瑞仙

■ EZAKI Mizunori

荒川 泰彦

■ ARAKAWA Yasuhiko

光通信で使われている波長 1.3～1.5 μm 帯のインジウム ガリウム ヒ素 リン (InGaAsP) 系半導体レーザには、光出力の温度依存性が大きいという問題がある。電子と正孔を微細な領域に閉じ込められる量子ドットを発光領域に使うと、半導体レーザの温度特性、高速変調性、発振しきい値などを大幅に改善できるものと期待されている。

東芝と東京大学は共同で、量産性に優れた有機金属気相成長 (MOCVD: Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) によるガリウム ヒ素 (GaAs) 基板上的インジウム ヒ素 (InAs) 量子ドットレーザの開発を進めている。光通信波長での発振が課題であったが、量子ドットをガリウム インジウム 窒素 ヒ素 (GaInNAs) で埋め込む技術の開発により発光特性を改善し、この半導体レーザで世界最長^(注1)の波長 1.288 μm の室温発振を実現した。

A semiconductor laser with a quantum dot (QD) active region promises ultralow threshold current, temperature-insensitive threshold current density, and high-frequency modulation.

Toshiba and the University of Tokyo have developed InAs QD lasers on GaAs substrate for 1.3 μm and 1.5 μm optical fiber communication. We improved the optical property of the InAs QD by embedding it in GaInNAs, and successfully achieved room-temperature lasing operation with the longest wavelength of 1.288 μm in QD lasers grown on GaAs substrate by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD).

1 まえがき

量子ドットとは、半導体や金属などで構成される、直径およそ数十 nm の微小な粒子のことである。量子ドットに3次元的に閉じ込められた電子は、通常の連続的なエネルギーバンドではなく、離散的なエネルギー準位を形成する。このため、量子ドットをレーザに応用した場合、発振しきい値が低い、温度依存性が小さい、より高速で波長ぶれの小さな変調をかけられるといった、従来の半導体レーザより優れた特性が得られることが理論的に予測されている。近年では、従来の半導体レーザを上回る性能のものが実際に得られるようになってきており、一部では実用化も始まっている。

現在、光ファイバ通信の波長 1.3～1.5 μm 帯の光源として、インジウム リン (InP) 基板上的インジウム ガリウム ヒ素 リン (InGaAsP) 系半導体レーザが使われているが、高コストで、温度依存性が大きいのが難点である。ガリウム ヒ素 (GaAs) 基板上的インジウム ヒ素 (InAs) 量子ドットレーザは波長 1.3～1.5 μm 帯での発振が可能であり、InGaAsP 系半導体レーザに置き換わる、低コストで高性能の光通信用レーザとして期待されている。

東芝は、文部科学省の“IT プログラム－光・電子デバイス技術の開発”に参画し、量子ドットに関して最先端の研究機関

(注1) 2006年9月現在、当社調べ。

である東京大学荒川研究室と共同で、ガリウム インジウム 窒素 ヒ素 (GaInNAs) 材料を用いた GaAs 基板上的光通信用 1.3～1.5 μm 帯の半導体レーザの開発を行っている。量子ドットレーザの研究においては、界面制御性に優れた原子ビームエピタキシ (MBE: Molecular Beam Epitaxy) 法による開発が先行しているが、われわれは量産性に優れた有機金属気相成長 (MOCVD: Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 法による作製に注力している。ここでは、GaAs 基板上 InAs 量子ドットの結晶成長技術、独自技術である GaInNAs ひずみ緩和層成長技術、及び MOCVD 法における世界最長発振波長を示した量子ドットレーザの特性について述べる。

2 GaAs 基板上自己形成 InAs 量子ドット

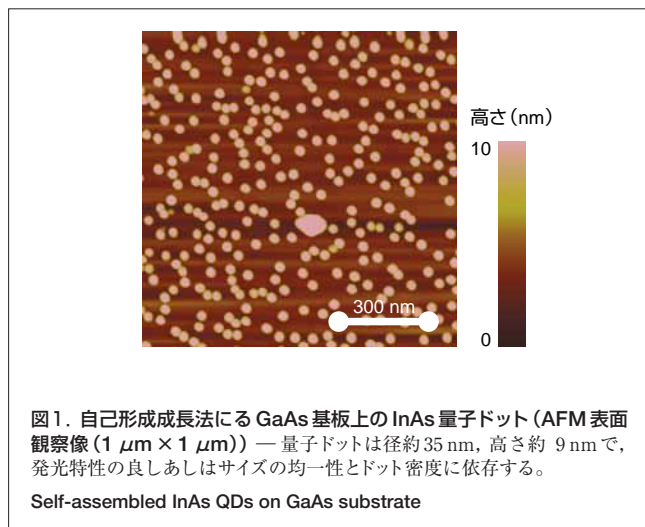
量子ドットは、量子効果を体現する究極のナノ構造として、1982年に荒川、榊らによって理論提案された⁽¹⁾。当初、量子ドットの作製法はリソグラフィ技術を活用するものが主流であったため、エッチングなどによる加工損傷を招きやすく、発光特性が劣化するといった問題があった。しかし、1990年代に、Stranski-Krastanow (S-K) モードと呼ばれる結晶成長モードを利用した量子ドットの自己形成成長法が開発が進んだ。その結果、結晶品質の高い量子ドット構造が作製できるようになり、量子ドットを応用したデバイスの研究は大きく発展した。

S-K モードとは、基板と成長物質の格子定数が異なる場合、

結晶の成長に伴い蓄積するひずみがある臨界点を越えたときに、結晶の成長が、平たんな2次元成長から量子ドットのような3次元成長に移行するタイプの成長モードのことである。

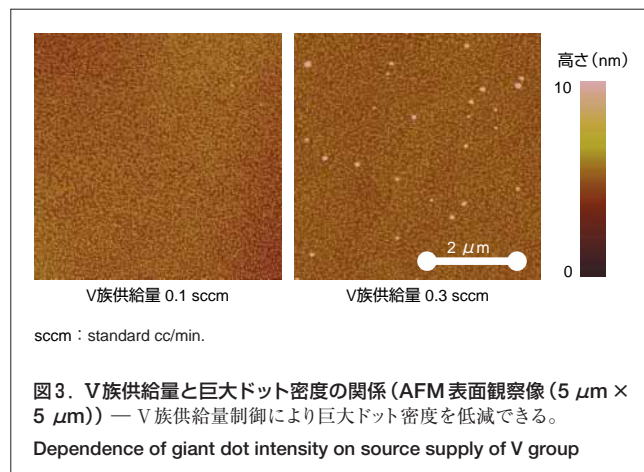
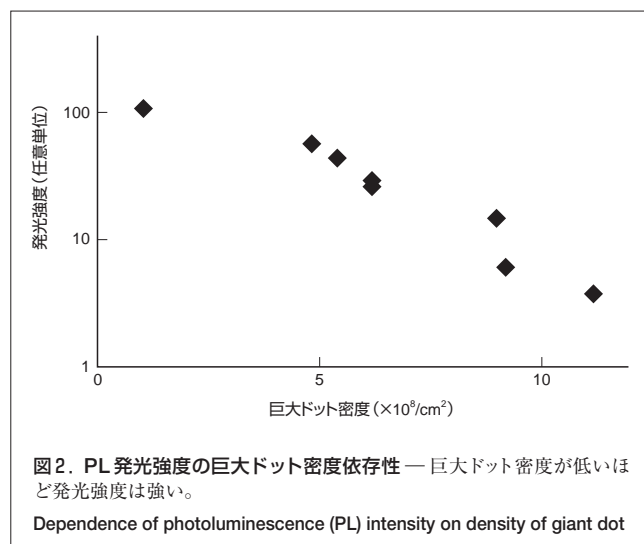
GaAs 基板上的 InAs 量子ドット自己形成成長の場合、両者の格子定数差が約7%あるため、InAsを約1.7モノレイヤ(ML)以上たい積すると、成長モードが3次元成長に移行し、量子ドット構造の形成が始まる。このとき、成長速度、成長温度、InAsのたい積量、V族・Ⅲ族原料供給量比(V/Ⅲ比)といったパラメータを適正な値に定めると、密度が高く、サイズが均一で、発光特性に優れた量子ドットを成長させることができる。ただし、良質な量子ドットが得られる適正值の範囲は非常に狭く、わずかな成長条件のずれで特性は急激に低下する。

自己形成法により成長したGaAs基板上的InAs量子ドットの原子間力顕微鏡(AFM: Atomic Force Microscope)による表面観察像を図1に示す。量子ドットのサイズと発光波長の間には密接な関係がある。通信波長帯の発光を得るためには、図1に観察できるような径約35 nm、高さ約9 nm程度の量子ドットが望ましい。図1にはそうしたサイズの量子ドットのほかに、径50 nmを超える大きな量子ドットも観察される。このような大きなドットは巨大ドットと呼ばれ、蓄積しているひずみ量が大きすぎるために結晶欠陥の原因となり、発光特性を悪化させる。



量子ドットのフォトルミネッセンス(PL: Photo Luminescence)発光強度の巨大ドット密度依存性を図2に示す。巨大ドット密度が低いほど、発光強度が強い。すなわち、巨大ドットを減らし、サイズのそろった高密度の量子ドットを形成することが、成長条件の重要な検討指針となる。

こうした検討指針のもと、成長条件を詳細に検討するなかで、巨大ドット密度低減には特にV族の供給比を下げることで有効であることが明らかになった。V/Ⅲ比を変えた量子ドット試料のAFM表面観察像を図3に示す。このような検



討の結果、図3(左)に示すようなサイズのそろった量子ドットを高密度に成長する条件を見いだした。

3 GaInNAs 埋込み技術

量子ドットレーザを作製するためには、活性層である量子ドット層の上に、光を閉じ込めるためのGaAs光ガイド層、キャリアを注入するためのアルミニウム ガリウム ヒ素 (AlGaAs) クラッド層などを成長させる必要がある。InAs量子ドットを格子定数が7%小さいGaAsで埋め込むと、引張ひずみにより量子ドットのエネルギー準位が高くなり、発光波長が短波長化する。このため、GaAsで埋め込まれたInAs量子ドットの発光波長は1.2 μm前後になり、光通信で使われる波長1.3~1.5 μm帯の発光が得られない。

発光波長を長波長化するには、InAs量子ドットをGaAsではなく、GaInAsなどのひずみ緩和層(SRL: Strain Reducing Layer)と呼ばれる層で埋め込むのが一般的である。GaInAsはGaAsと比較して格子定数がInAsに近いので、量子ドットの

ひずみを小さくできる。In 組成比を調整することにより、1.3 ~ 1.5 μm 帯の発光を得ることができる。

しかし、SRL の In 組成比を高くすると、活性層全体のひずみが大きくなるため、埋込み後の結晶の平坦性が悪くなり、発光効率を低下させる要因である転位などの欠陥が増える。SRL の In 組成比を変化させたときの量子ドットからの PL スペクトルの変化を図 4 に示す。In 組成比を増やすと発光波長は長くなるが、発光強度が下がってしまう。発光領域であるドット部分の体積が少ない量子ドットレーザにおいては、わずかな発光強度の低下も深刻となる。このため、波長が長いほど、量子ドットレーザを発振させることが難しくなる。

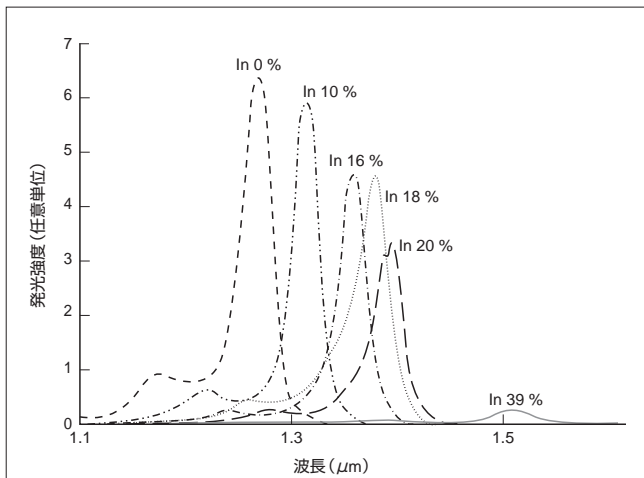


図 4. 発光波長の SRL 中 In 組成比依存性 — In 組成比を高くするほど発光強度が低下するため、量子ドットレーザの長波長での発振には困難が伴う。

Dependence of PL wavelength on In composition in strain reducing layer (SRL)

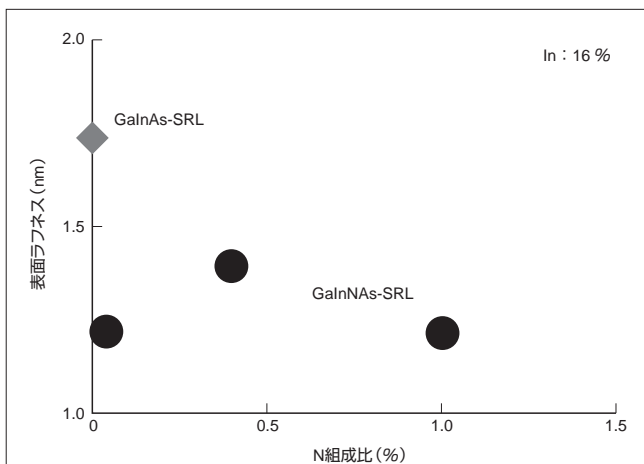


図 5. 表面ラフネスの SRL 中 N 組成比依存性 — GaInNAs-SRL を適用した資料は表面の平坦性が高く、量子ドットレーザの特性向上が期待できる。

Dependence of surface roughness on N composition

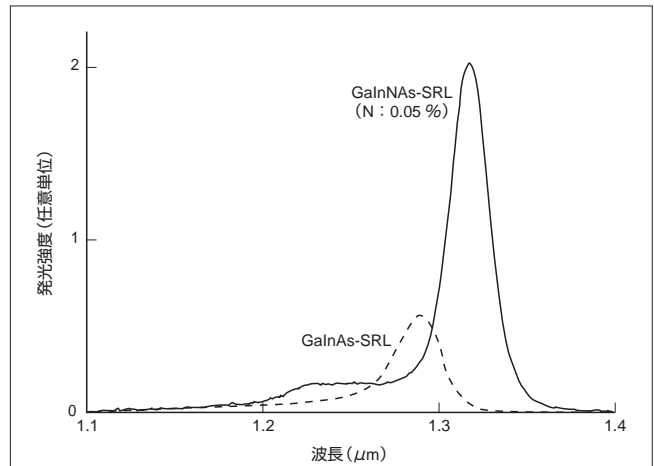


図 6. GaInAs-SRL サンプルと GaInNAs-SRL サンプルの PL スペクトル比較 — GaInNAs-SRL の適用により発光強度が増大する。

PL spectra of GaInNAs and GaInAs-SRL samples

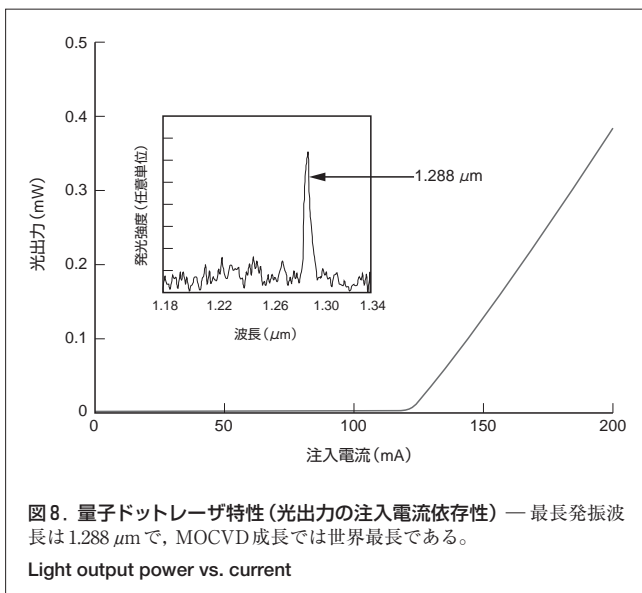
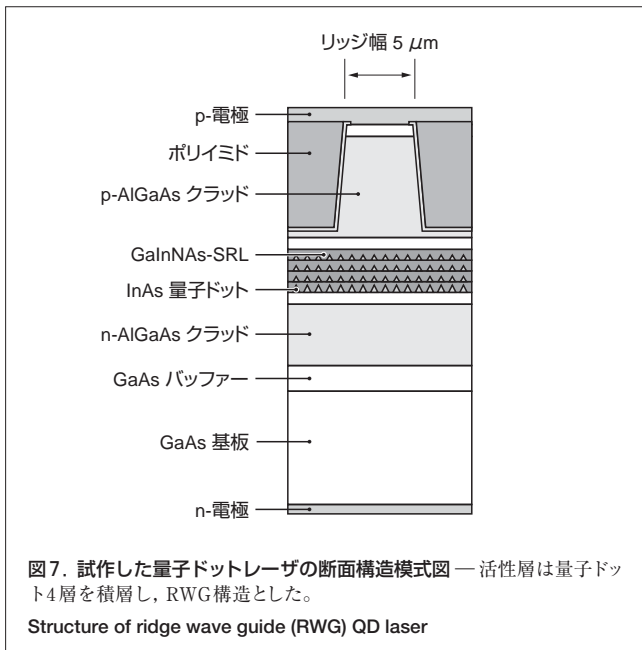
われわれはこの問題を克服するために、GaInAs-SRL に微量の窒素(N)を加えたGaInNAs-SRLを使うことを検討し、その結果、埋込み後の平坦性や発光強度を改善できることを発見した⁽²⁾。

GaInAs-SRL と GaInNAs-SRL を適用した試料の埋込み後の表面ラフネスと PL スペクトルを、それぞれ図 5、図 6 に示す。GaInNAs-SRL を適用することで、埋込み後の表面ラフネスが低減され、発光強度も増大している。すなわち、GaInNAs-SRL を適用することで、量子ドットレーザの特性向上が期待できることがわかった。

4 量子ドットレーザの発振特性

このように検討を重ねた量子ドットを活性層として適用した、リッジ導波路(RWG: Ridge Wave Guide)型量子ドットレーザの断面構造模式図を図 7 に示す。量子ドットレーザでは、光源となるドット部分の体積が小さいために、量子ドット層を幾層も積層成長して発光強度(利得)を稼ぐのが一般的である。われわれの量子ドットレーザでは4層の量子ドット層を積層している。測定に使用した素子は、共振器長 1.2 mm、リッジ幅 5 μm であり、へき開端面には高反射膜を蒸着している。

室温におけるパルス駆動による電流-光出力特性、及び発振スペクトルを図 8 に示す。室温における発振しきい電流値は約 110 mA で、発振波長は 1.288 μm であった。この発振波長は MOCVD 法による量子ドットレーザとしては、世界最長である。ドットサイズの均一化、GaInNAs-SRL のひずみ緩和効果による発光波長の長波長化、埋込み平坦性の向上を同時に図れたことが、長波長域での室温発振達成につながったものと考えている。



5 あとがき

GaAs基板上のInAs量子ドットレーザにはInGaAsP系レーザより優れた特性が期待されているが、発振波長の長波長化や低しきい値化など、実用化にはまだ様々な課題が

ある。ここでは、MOCVD成長によるInAs量子ドットの埋込みにGaInNAs材料を用いることが、光通信で使われる波長1.3 μm帯のレーザ発振に有効であることを示した。今後は、更に長波長域である1.5 μm帯量子ドットレーザを実現するとともに、量子ドットレーザに期待されている他の様々な優れた特性を実現し、波長域1.3～1.5 μm帯の波長多重通信への応用を目指していきたい。

謝 辞

この研究は、文部科学省ITプログラムの一環としてなされた。ご支援いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) Y. Arakawa; H. Sakaki. Multidimensional quantum well lasers and temperature dependence of its threshold current. Appl. Phys. Lett. **40**, 11, 1982, p.939-941.
- (2) R. Hashimoto, et al. "Continuous wave lasing from ground state of InAs quantum dots with GaInNAs strain reducing layer grown by MOCVD". 2006 MRS Spring Meeting, DD4.3. 2006-04.



橋本 玲 HASHIMOTO Rei

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー。量子ドットレーザ、面発光レーザの結晶成長技術の研究・開発に従事。応用物理学会会員。
Advanced Electron Devices Lab.



櫛部 光弘 KUSHIBE Mitsuhiro

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー主任研究員。量子ドットレーザ、面発光レーザの結晶成長技術の研究・開発に従事。応用物理学会会員。
Advanced Electron Devices Lab.



江崎 瑞仙 EZAKI Mizunori

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー研究主務。量子ドットレーザ、面発光レーザのデバイス化プロセス技術の研究・開発に従事。応用物理学会会員。
Advanced Electron Devices Lab.



荒川 泰彦 ARAKAWA Yasuhiko, D. Eng.

東京大学 先端科学技術研究センター教授、生産技術研究所教授、ナノエレクトロニクス連携研究センター長、工博。量子ドットデバイスの開発、ナノ光電子物性の研究などに従事。
University of Tokyo