

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06041

研究課題名(和文) 近接・低歪み多重積層構造を適用した量子ドットレーザの高効率化に関する研究

研究課題名(英文) Study on high efficiency multi stacked quantum dot laser with thin barrier layer

研究代表者

五島 敬史郎 (GOSHIMA, Keishiro)

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00550146

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：量子ドットレーザは、低閾値、温度安定を持つレーザとして期待されている。しかしながら、光増幅率が少ないという問題がある。これまで高密度で高均一な量子ドット成長技術によって8cm-1の光増幅率を達成してきた。さらなる光増幅率向上を目指して、量子力学的相互作用による結合効果を利用した構造を検討してきた。

この研究では、バリア層の違う構造をVSL法を用いて光増幅率を観測した。我々は、2重近接積層構造を提案した。この構造は、高い結晶品質を維持しながら強い量子力学的相互作用も持ち合わせる特徴を持っている。VSL法を用いた観測から、今回提案した2重近接積層構造が他の一般的な構造に比べて最も高い光増幅率を得た。

研究成果の概要(英文)：A Quantum dot laser (QD laser) is expected to have a low threshold current density and high thermal stability. However, certain problems arise in that a QD laser exhibits inadequate modal gain, transverse operation mode control etc. In our previous work, we achieved 1.3 mm high density, high-uniformity QDs. And we also realized a high modal gain with 8cm-1/QD layer with current injection method. Moreover, high modal gain, we carried out of the multi stacked QD layers with thin barriers because of a introducing to quantum mechanical coupling between vertical QDs.

In our study, we carried out the optical gain of multi-stacked QDs different barrier layers using a variable stripe length (VSL) method. We proposed the double thin multi-stacked structure that it has two features with the keeping high crystal quality and strong quantum mechanical interaction. We observed from VSL method that the double thin multi-stack structure is the highest optical gain than that conventional structure.

研究分野：半導体光物性

キーワード：半導体工学 低次元デバイス 化合物半導体 量子ドット

1. 研究開始当初の背景

量子ドットレーザは、1. 高い量子効率による光増幅率特性(超低消費電力駆動)、2. 再結合時間が短い(高速変調動作が可能)、3. 温度依存性が非常に小さい(動作温度範囲の拡大)の3つの特徴を持ち、既存の半導体レーザの性能のすべてを凌駕する理想的な半導体レーザとして、1982年に荒川、榊らによって理論提案された。それ以降、量子ドットレーザは盛んに研究され、近年では民間ベンチャー企業のQDレーザ(株)から温度依存性の少ない量子ドットレーザが実用化されている[1]。

しかしながら、未だ既存の量子井戸半導体レーザと比べて動作電流は多く消費電力も大きい。その最も大きな理由は、「レーザデバイスにしたときの光増幅率が低い」ことである。光増幅率は、量子ドットの総数とドットの結晶品質に比例する。そのため、主に量子ドット結晶成長技術の向上に主眼が置かれてきた。量子ドットの結晶欠陥を減らす成長方法や、高層ビルのような構造(多重積層構造)で量子ドットの総数を増やす方法がとられてきたが、それでもまだ量子井戸レーザと比べて光増幅率は十分ではなく限界が見え始めている。よって別の方法で光増幅率を引き上げる技術が必要である。

2. 研究の目的

そこで本申請では結晶成長技術の向上ではなく、別の方法として量子ドットの多重積層構造に着目する。本申請は発光メカニズムに量子力学的結合効果を積極的に利用する近接多重積層構造(詳細は後述する)にする。これにより、量子ドットの総数を増やすことなく(1)光増幅率の大幅に高め、動作電流を低減する。(2)再結合時間の短縮により高速変調動作を向上させる。さらに、近接多重積層と低歪み効果の両方を狙った近接低歪み積層構造を提案する。

図1(a)に示すのが現在の量子ドットレーザで用いられている積層構造のバンドギャップ図である。個々の発光再結合を利用して量子力学結合効果を利用していない。申請者は、図1.(b)に示す従来の積層構造から近接積層構造とすることで量子力学的結合を積極的に利用させる。これにより隣り合う量子ドットのお互いの波動関数が結合する。その結果、図1(a)の従来の構造に比べて発光再結合領域が大幅に増加する(図1(b)の網掛け枠内が発光再結合領域)。領域が拡大するので発光再結合する確率が増加する。さらに再結合に要する時間も短くなるので光増幅率及び再結合時間の短縮という一石二鳥の効果が得られると予想する。しかし、近接多重積層の条件下では量子ドット成長技術において歪みが発生し易くなる。これを避けるために図2に示す歪みの影響を最小限にする構造にする。2層の近接結合積層構造、歪み補償

成長を取り入れた構造を交互に取り入れる近接・低歪み積層構造を採用する。

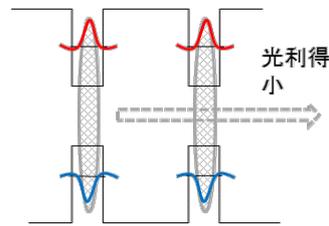


図1(a)：従来の多重積層構造発光メカニズム

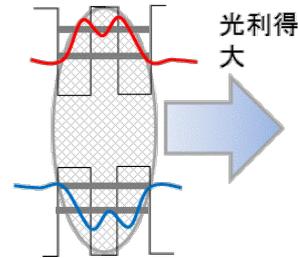


図1(b)：近接積層構造を適用した発光メカニズム

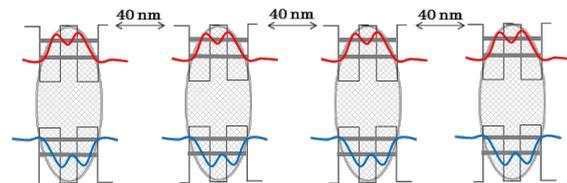


図2：近接・低歪み積層構造のバンドギャップ図

3. 研究の方法

(1). 量子力学的結合を実現させるための近接積層間膜厚の算出

申請者の提案構造を実現するためには、量子力学結合効果を用いる事が必須である。そのため、今回の狙いとする量子ドットレーザの材質、大きさ、発光波長、印加電圧などの実際の条件のもとで、どの程度の積層間膜厚が最適なのかを正確に見積もる必要がある。有効質量近似のシュレーディンガー方程式を基として各種パラメータを組み込みシミュレーション解析を行った。

(2). 近接・低歪み積層量子ドットの成長シミュレーションから得た、積層間膜厚を基に量子ドットの成長を行う。この成長は、産業技術総合研究所にて量子ドットを成長する。さらに理論面と成長技術面でディスカッションを密に行った。

(3) 積層量子ドットの評価

成長した積層量子ドットの量子力学的結合効果、発光再結合寿命、光増幅率、及び量子ドット歪みについて測定を行い、総合的に判断する。評価をするに当たり4つの評価方法を行う。評価を行うだけでなく、ここから得た評価結果を量子ドット結晶成長にフィードバックを行った。

量子力学的結合効果に対する評価
光増幅率に対する評価

実験方法としては、励起光のストライプ長を変化させて量子ドット試料端面からの発光強度のストライプ長依存性を測定する SVL法を用いる。

量子ドットの成長歪みに対する評価

歪みを高精度に観測する方法として光変調反射分光法を用いる。この方法を採用することにより、量子ドット表面近傍での不純物準位や局所歪みによるバンド構造の変化を評価した。

4. 研究成果

(1) 量子力学的結合を実現させるための近接積層間膜厚の算出

上下に積層された量子ドット間距離とサブバンド準位との相互作用を検証する為に理論計算を行った。理論計算をするに当たり、量子力学のシュレーディンガー方程式を用いた。今回仮定としているモデルは、半導体 GaAs 中に埋め込まれた形をしている InGaAs 量子ドットである。そのため、式(1)に示す有効質量近似を用いたシュレーディンガー方程式を解析的に解いた。

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2} \left(\nabla \left(\frac{1}{m_e} \Delta \psi(r) \right) \right) + V(r) \psi(r) = E \psi(r) \quad (1)$$

上式を基に実際の形状に近づけるため、有限要素法を用いて3次元に拡張したシュレーディンガー方程式を解析した。ここで量子ドットの形状は、断面 TEM 写真より、ピラミッド形状とし底辺の長さは 20 nm、量子ドットの高さは 5 nm と仮定した。

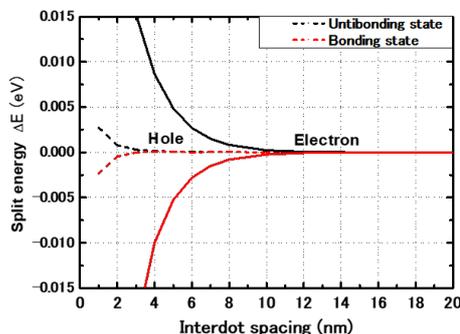


図3. ドット間距離に対する結合状態の変化

図3は、計算された上下の量子ドット間距離に対する基底準位の変化を示している。上下

の量子ドット間の波動関数は量子力学的な相互作用を起こし、結合状態の波動関数と反結合状態の波動関数に分裂していく様子が分かる。理論計算の結果、ドット間隔が 10 nm を超えるような広い場合には、上下の量子ドット間に量子力学的な効果は働いていない。ドット間隔が 10nm 以下になると電子の波動関数が結合することが分かった。また正孔の波動関数は 4nm 以下で結合することが計算より明らかとなった。

(2) 近接・低歪み積層量子ドットの成長

シミュレーションから得た層間膜厚を基に、研究協力者である産業技術総合研究所サンプル製作を行っていただいた。

サンプルは合計7種類に上った。層間膜厚は、15nm, 10nm, 7nm, 3.5nm の4種類および、比較検証のため2種類の構造を用意した。一つ目は、近接積層 10 層構造のサンプル。もう一つが今回提案した近接 2 層積層 8 層のサンプルである。

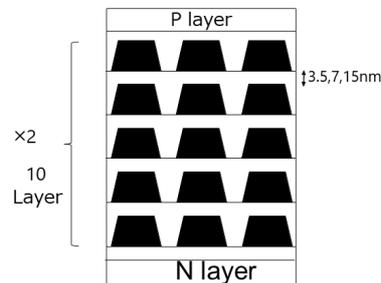


図4. 近接積層構造サンプル模式図

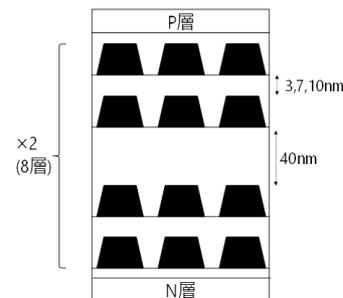


図5. 近接2層積層構造サンプル模式図

(3) 積層量子ドットの評価1

量子ドットの成長歪みに対する評価

量子ドット積層構造は、その成長方法の特徴から結晶内に歪を引き起こしやすい。その歪が大きくなると、結晶欠陥やバンド構造の変化を誘発し性能劣化を招く。よってこの内部歪を正確に測る実験装置を新たに構築した。光変調反射分光法である。

図6に、結果を示す。実験結果より、大きな振動を示す信号が観測された。他の論文結果より振動ピークにHHとLHが高い精度で検

出された。内部歪が大きいほどHHとLHの差が大きくなる傾向が報告されており、今回の結果から予想通り歪が生じていることがはっきりと分かった。

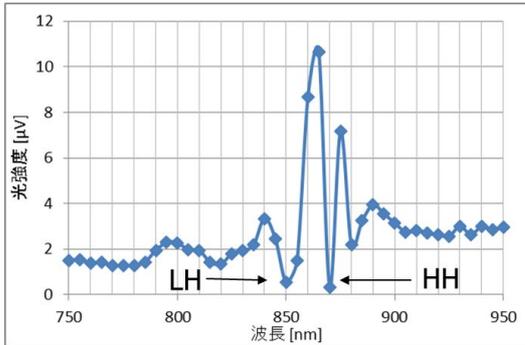


図6．光変調反射分光法による結果

(3) 積層量子ドットの評価2

光増幅率に関する評価

本研究において、光増幅率の想定にはVariable Stripe length (VSL) 法を導入した。この方法の利点はサンプル電極などのデバイス工程を用いずに測定できることである。この測定方法の概略図を図7に示す。

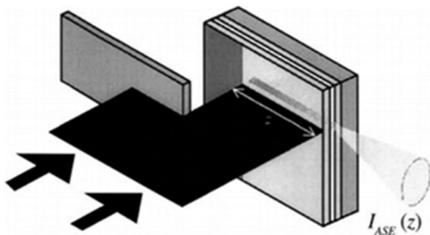


図7．VSL法の概略図

図8に光増幅率の結果を示す。赤色が従来の方で作成した量子ドット構造、黄色が近接接合積層の量子ドット構造、青色が今回提案して作成した2重積層近接構造である。それぞれドット間距離と光増幅率のパラメータで示してある。

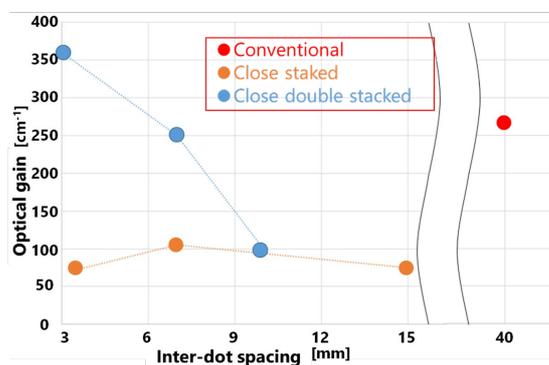


図8．それぞれの構造における光増幅率

まず、従来構造(赤丸)では、 260cm^{-1} の光増幅率が観測された。ただし、ドット間距離は

40nm 離しており量子力学的相互作用は無い。

近接接合構造(黄色)では、ドット間距離を15nm以下に近接させている。特に10nm以下では、量子力学的相互作用が働いている領域である。にも拘わらずかわらず光増幅率は $70\sim 100\text{cm}^{-1}$ 程度に大幅に減少した。これは、量子ドット内部に歪が蓄積し、欠陥などの結晶品質を低下によるものと考えられる。

2層近接接合構造(青色)は、ドット間隔によって光増幅率は大きく変化していることが分かる。ドット間隔10nmでは 100cm^{-1} 程度であるがドット間隔が狭くなるにつれて増幅率が上昇し、ドット間隔3.5nmでは 350cm^{-1} となった。この理由としては、2つあると考えている。1つ目は2層積層とすることで量子ドット内部の歪を最小限にとどめた形になっている事である。そのため結晶品質の劣化が少ないと考えられる。もう一つは、量子力学的相互作用による波動関数に結合効果である。量子ドット間隔10nmでは、電子の波動関数のみ結合し、正孔の波動関数は結合していない状態にある。この場合、コヒーレントボリュームが減少するので光増幅率が低下する。一方量子ドット間隔3.5nmでは電子および正孔の波動関数が結合するのでコヒーレントボリュームは大幅に上昇する。よって光増幅率も大幅に大きくなったと考えられる。

以上のことから、本申請で提案した2層近接接合構造は、ドット間距離が小さい状態において、光増幅率の増加することを実証した。さらに、今までの一般的な量子ドット構造の光増幅率と比較して、より大きい光増幅率が達成できていることが分かる。

今後の方針として、量子ドットの面内密度の成長条件をさらに精査することにより、2層近接接合構造の光増幅率はさらに増加することが期待される。

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 10 件)

Kazuhiro KOMORI, Takeyoshi SUGAYA,
Takeru AMANO and Keishiro GOSHIMA
「Nano photonic devices based on
semiconductor quantum nanostructures.」
IEICE, TRANS, ELECTRON,
VOL.E99-C.No3, pp346-357, (2016,3) 査読有

杉下裕磨、犬飼圭祐、五島敬史郎
シリコン材料を発光源とした光通信回路の
開発。電気学会電子回路研究会報告
ETC-16-74, pp31-35 (2016) 査読無

水嶋大輔, 吉松剛, 山口剛, 五島敬史郎,
津田紀生, 山田諄
半導体レーザーの自己結合効果を利用したレ

ーザマイクロホンの超音波帯域特性
IEEJ Transactions on Electronics, Information
and Systems (2017) 137(3), pp.489-494 査読有

杉下裕磨、犬飼圭祐、五島敬史郎
「シリコン発光増強を目的としたデバイス
構造の検討」電子情報通信学会 信学技報
(IEICE Technical Report) Vol.117 No.268,
p p 17-23 (2017) 査読無

犬飼圭祐、梅田大河、佐藤涉、津田紀生、
菅谷武芳、五島敬史郎
「歪補償を用いない InGaAs/GaAs 近接接合量子
ドットの光学的手法を用いた中間バンド
状態の解析」光物性研究会 研究報告
□ B-84、 p p.339 - 343 (2017) 査読無

杉下裕磨、犬飼圭祐、五島敬史郎
「シリコン高効率発光に向けた構造条件の
検討」IEEJ Transactions on Electronics,
Information and Systems, Vol.138 No.4
pp.375-380 (2018) 査読有

Keishiro Goshima, Norio Tsuda, Keisuke
Inukai, Takeru Amano and Takeyoshi
Sugaya
「Inter-dot spacing dependence of electronic
structure and properties in multi-stacked InGaAs
quantum dots fabricated without strain
compensation techniques」. Japanese Journal of
Applied Physics, accept 査読有 掲載決定

V. O. Eze, Y. Seke, T. Mori,
“Efficient planar perovskite solar cells using
solution-processed amorphous WOx/fullerene
C60 as electron extraction layer”, Organic
Electronics, 46 (2017), pp.253-262. 査読有

T. Mori, D. Sato, T. Egam, V. O. Eze,
“Improvement of Photovoltaic Properties for
Unmodified Fullerene C60-Based Polymer Solar
Cells by Addition of Fusible Fullerene”, J.
Photopolym. Sci. Technol., 30 (2017) pp.581-587

〔学会発表〕(計 30 件)

K.Goshima, N.Tsuda, T. Sugaya,
”Inter mediate band in multi sstacked
InGaAsBand formation in multi stacked InGaAs
quantum dots” Photovoltaic Science and
Engineering Conference, 1-1-1e (21016)

K.Goshima,N tsuda, K.inukai,and T.Sugaya
”Coupling effect characteristic of InGaAs/GaAs
multistacked quantum dots without strain
balancing” internal microprocesses and
nanotechnology, 9A-10-2 (2017)

W Niwa, R Kobayashi, Y Sugishita, and K.
Goshima High Efficiency Light Emission

using silicon P-I-N structure with alkali meal
doping Internal workshop on green energy
system and devices,P-42 (2107)

K.Goshima, N Tsuda, K Komori and T
Sugaya
Band formation in multi stacked InGaAs
quantum dots with various inter-dot spacing
Internal workshop on green energy system and
devices,P-43 (2107)

K.Goshima,N tsuda, K.inukai,and T.Sugaya
Optical gain of multi stacked InGaAs quantum
dots using VSL method Advanced lasers and
photon sources (ALPS2018) p-35

“Air-Flow-Combined 2-Step Fabrocation
Process for Organic Perovskite Solar Cells”,
T. Mori B. Lei, V. O. Eze, 2016 Int’l Sympo.
on Novel and Sustainable Technology,
Tainan, Taiwan, Oct. 6-7, 2016.

“Improvement of Morphology of Active
Layer for C60-Based Organic Photovoltaic
Cells”, T. Mori, Taiwan, International
Conference (OPTIC2016), 2016-SAT, 台湾
科技大学,Taipei, Taiwan, Dec. 2-5 (2016)

他 国内学会 は省略

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

〔その他〕
無し

6. 研究組織

(1)研究代表者

五島 敬史郎 (GOSHIMA Keishiro)
愛知工業大学 工学部 准教授
研究者番号: 00550146

(2)研究分担者

津田 紀生 (TSUDA Norio)
愛知工業大学 工学部 教授
研究者番号: 20278229

森 竜雄 (MORI Tatsuo)
愛知工業大学 工学部 教授
研究者番号: 40230073

天野 健 (AMANO Takeru)
産業技術総合研究所 主任研究員
研究者番号: 10392581