

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究 (B)
研究期間：2008～2009
課題番号：20760481
研究課題名 (和文) 半導体量子ドット構造の不均一性解明とその制御
研究課題名 (英文) Control of in-homogeneity of semiconductor quantum dot structure

研究代表者

山本 直克 (YAMAMOTO NAKATSU)

独立行政法人情報通信研究機構・新世代ネットワーク研究センター・先端 ICT デバイスグループ・主任研究員

研究者番号：60328523

研究成果の概要 (和文) : 半導体量子ドットの構造不均一性の発生メカニズムを実験的に考察し、その不均一性制御のための新技術として、①アンチモン分子照射法、②サンドイッチ・サブナノ・セパレータ法を開発・提案した。構造不均一性が制御された量子ドット構造を光ゲイン材料とする量子ドットレーザダイオードを作製した。その結果、波長 1.0、1.3 ミクロン帯の近赤外域で超広波長帯域光出力を示すレーザ光源の開発に成功した。

研究成果の概要 (英文) : I successfully demonstrated an ultra-broadband light emission in the 1.0- or 1.3-micron waveband from a QD laser diode formed by the controlling technique of in-homogeneous QD structure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：量子ドット、半導体ナノ構造、化合物半導体、広帯域発光、結晶成長、不均一構造

1. 研究開始当初の背景

自己組織化で形成される数ナノメートルサイズの半導体微細構造である量子ドットは、その構造上の不均一性を有し、この不均一性に起因した発光波長などの光電子物性の不均一性を示すことになる。発光特性を持つ半導体量子ドットは発光効率が高いことが知られているが、その発光スペクトルの波長帯域幅は量子ドットの構造不均一性に直

接影響を受けている。これは量子ドットが量子井戸やバルクと異なりドット間でのキャリア移動などの相互作用が小さく、量子ドットが個々に持つ構造にあった独立の発光特性を示すことによる。量子ドットレーザの開発では一般的に量子ドットの構造不均一性を少なくする研究方向、つまり同じ発光波長で発光するドットを高密度に形成することに注力されている。この研究の方向性により

開発された量子ドットレーザは広く研究され、近年ではスモールビジネスへと展開が期待されている。

しかし、一方で量子ドットが個々の波長で発光する特性を利用することで帯域幅の制御性の高い発光デバイスを開発することが可能になると考えられる。つまり、量子ドットの構造不均一性を任意に制御することができれば、発光波長の帯域を任意に制御することが可能になる。量子ドットの構造不均一性制御を行った発光材料を開発することができれば、従来では開発が困難であった超広帯域の発光デバイスの実現が期待される。

2. 研究目的

波長 1 ミクロン帯を T-band (Thousand-band: 1000-1260-nm) と称し、また合わせて O-band (1260-1360-nm) にかかる波長帯域の光源に注目している。半導体量子ドットはこの T および O-band で効率よく発光することから、近赤外光源用材料としての有効性が期待される。一般に量子ドットを用いたレーザ開発が主として広く行われ、そのドット構造の均一性を高度化する研究が広く行われている。一方、医療用途やセンシングの分野では先の近赤外波長帯域が効率的に利用可能であることから、この波長帯域に渡る光源の広帯域化と高出力化が求められている。量子ドット構造の不均一性が制御され、広い帯域の発光が実現されることで、多くの産業分野に用いられる広帯域光源の高度化が達成できると期待できる。しかしながら、量子ドットの構造不均一性制御に関する方法やその物性に関する報告は少ない。本研究では高効率・広帯域光源開発のための有用な材料作製技術となるような、半導体量子ドットの構造不均一性発生メカニズムおよび新たな不均一性制御方法の開発を目的とする。

3. 研究方法

T および O-band 発光を目的として、InAs 半導体量子ドット構造を GaAs もしくは InGaAs 結晶上に分子線エピタキシー法を用いて作製した。本研究課題では量子ドットの構造不均一性を制御する 2 つの技術として①アンチモン分子照射技術と②原子オーダー層間分離技術を提案し、良好な不均一性制御が達成された。次章にて各技術の詳細を示し、またその構造不均一性制御技術を用いた超広帯域光源開発の成果を示す。

4. 研究成果

(1) アンチモン材料を用いた量子ドット構造不均一性制御技術

図 1 (a) に従来技術で作製された InGaAs 量子井戸中に埋め込まれた InAs 量子ドット

構造の模式図と表面原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope) 像を示す。AFM 像で結晶成長の不均一性に起因する巨大ドット構造が数多く観測された。このような巨大ドット構造は量子ドット光デバイスを作製する時に、結晶欠陥やデバイス性能劣化などの悪影響に起因する。本研究ではアンチモン分子照射技術として、図 1 (b) に示すような量子ドット作製前後に、アンチモン分子を表面に照射する方法を開発した。図 1 (b) の AFM 像より巨大ドット構造の発生が極端に抑えられることが確認された。アンチモン分子を表面に照射するのみの非常にシンプルな方法であるにも関わらずその構造不均一性の制御技術としての性能は有用であることが明らかとなった。

量子ドットの構造不均一性、特に巨大ドット構造の発生と抑制に関しては表面状態 (原子状態や表面エネルギーなど) の制御が重要であることが本研究で明らかとなった。

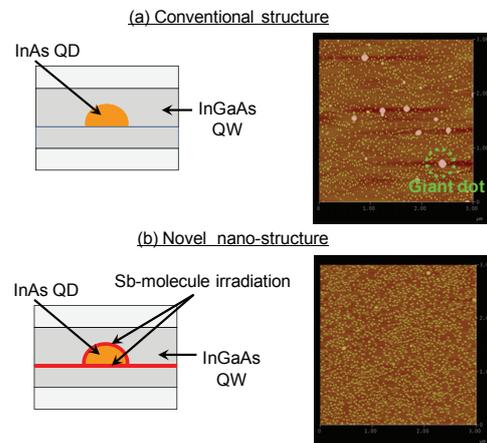


図 1 (a) 従来作製方法による量子ドット構造、(b) アンチモン分子照射技術による量子ドット構造不均一性制御

(2) 原子オーダー層間分離技術による量子ドット不均一性制御

図 2 (a) は先の図 1 (a) と同様に従来技術で作製された InGaAs 量子井戸に埋め込まれた量子ドット構造である。量子井戸層の In 組成が大きいと、巨大ドット構造がさらに高密度に発生していることが分かる。構造不均一性制御では量子ドット構造が形成される表面の状態とその制御が重要である。そこで原子オーダー層間分離構造を量子ドット形成表面の直下に挟む技術として、サンドイッチ・サブナノ・セパレータ (Sandwich sub-nano separator: SSNS) 構造を開発した。図 2 (b) に SSNS 構造の模式図とそれを用いた量子ドット構造の AFM 像を示す。SSNS 技術とは量子ドット形成直前に 0.8-nm 程度の薄い GaAs 層を挟み、表面状態を制御する手法である。図 2 (b) より、巨大ドット形成の抑制と量子ドットの高密度化が達成されたこ

とが明らかとなった。この高密度量子ドット ($8 \times 10^{10} / \text{cm}^2$) は波長 1.3 ミクロン帯で発光する量子ドットとしては世界最高級密度であると期待される。SSNS 技術は先のアンチモン分子照射技術と同様に非常にシンプルな技術であるが、その構造不均一性制御としての性能は有用である。また SSNS はアトムレベルの微細構造制御によることから、従来の結晶成長技術、例えば分子線エピタキシーや有機金属気相堆積法 (Metal organic chemical vapor deposition: MOCVD) との技術整合性が良いと考えられる。

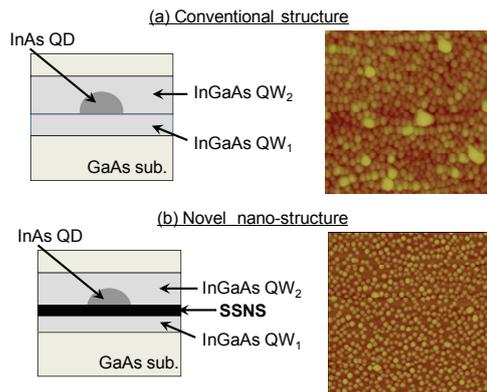


図 2 (a)従来作製方法による量子ドット構造、(b)サンドイッチ・サブナノ・セパレータ(SSNS)技術による量子ドット構造不均一性制御

(3)構造不均一性制御技術を用いた広帯域量子ドット光源の作製

構造不均一性制御技術として SSNS 技術を用いた積層量子ドット構造を作製し、それを活性層とする量子ドット半導体レーザダイオード構造を図 3 のように作製した。この積層量子ドットレーザに電流注入を行うことで T および O-band の波長帯域の中で約 60nm にわたる超広帯域レーザ発振を達成した。光出力は数 10mW 以上得られた。

以上の結果から、本研究課題では次の 3 つ成果が達成された。①量子ドットの構造不均一性発生メカニズム解明として、量子ドット形成時の表面状態 (原子分布や表面エネルギーなど) が不均一性発生に強く関与している可能性を明らかとした。②構造不均一性制御方法としては表面状態改質に寄与するアンチモン分子照射技術とサンドイッチ・サブナノ・セパレータ技術が有効であることを明らかとした。③構造不均一性制御技術を用いた積層量子ドット構造を作製し、それを量子ドットレーザダイオードの活性層に組み込むことで、T および O-band の波長帯域での超広帯域光源の実現が達成可能であることを明らかとした。

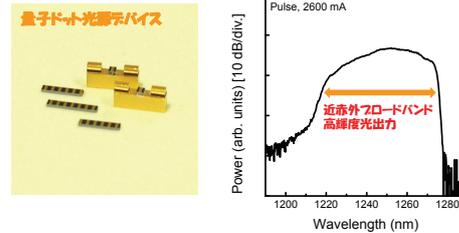


図 3 量子ドット光デバイス外観と構造不均一制御技術による積層量子ドット構造を用いた超広帯域・高輝度量子ドット光源の光スペクトル

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 1 件)

- ① Naokatsu Yamamoto, Hiroki Fujioka, Kouichi Akahane, Redouane Katouf, Tetsuya Kawanishi, Hiroshi Takai, and Hideyuki Sotobayashi, "O-Band InAs/InGaAs Quantum Dot Laser Diode with Sandwiched Sub-Nano Separator (SSNS) Structures," Proceedings of The Conference on Lasers and Electro-Optics, 査読無, DVD-ROM, 2009, JThE-12

[学会発表] (計 5 件)

- ① 山本直克、次世代超広帯域光伝送のフロントエンド技術 (チュートリアル講演)、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会、2009 年 12 月 11 日、日本女子大・東京
- ② 山本直克、変調量子ドット構造によるブロードバンド光源の作製、2009 年秋季 第 70 回応用物理学会学術講演会、2009 年 9 月 8 日、富山大学・富山
- ③ 山本直克、O-band InAs/InGaAs Quantum Dot Laser Diode with Sandwiched Sub-nano Separator (SSNS) Structure、Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO)、2009 年 6 月 4 日、バルチモアコンベンションセンター・バルチモア・アメリカ
- ④ 山本直克、Control on density and emission wavelength of III-V semiconductor quantum dot, Australia Japan Nanophotonics workshop、2008 年 12 月 10 日、キャンベラ・オーストラリア
- ⑤ 山本直克、O-Band InAs/InGaAs Quantum Dot Laser Diode with Sandwiched Sub-Nano Separator (SSNS) Structures, Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)、2008 年 7 月 8 日、シドニー・オーストラリア

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 直克 (YAMAMOTO NAOKATSU)
独立行政法人情報通信研究機構・新世代ネット
ワーク研究センター・先端 ICT デバイスグ
ループ・主任研究員

研究者番号：60328523

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：