

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 24 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360121

研究課題名(和文) 光利得を増強した積層量子ドットによる高機能偏波無依存光アンプの実現

研究課題名(英文) Development of high-gain, polarization-insensitive closely-stacked quantum dot optical amplifiers

研究代表者

喜多 隆 (Kita, Takashi)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10221186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：自己形成InAs/GaAs量子ドット(QD)を半導体光増幅器(SOA)に利用することにより、光ファイバーアンプでは対応できない波長帯域での広帯域増幅や超高速変調・波長変換などを実現することができる。われわれは近接積層QDを用いて偏波無依存応答が得られる高利得なQDSOAデバイスの開発を目的としており、30層以上積層したQDSOAにおいてTMモードの利得を十分に持つQDSOAを実現した。しかし、複数の横モードが存在するとモード毎に光信号パルスの伝搬速度が異なり、信号光パルスが歪んでしまい正確な増幅特性を得ることができない。本研究ではシングルモード動作を実現するために必要な条件を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We performed modal analysis for 40-stacked InAs/GaAs quantum dot semiconductor optical amplifiers (QDSOAs) as a function of the waveguide width using an equivalent refractive index technique. QDSOAs with 5- and 11-micro-m-waveguide widths show multi-mode operations. The theoretical simulation reproduced well the experimental electroluminescence spectrum and unveiled that the output signals comprise several transverse modes. Besides, we confirmed a waveguide width less than 1.28 micro-m is essential to realize single-mode QDSOAs. The modal gain spectra were analyzed by using the Hakki-Paoli method. Multi peaks arisen from the multi-mode operation were also observed in the gain spectrum, suggesting precise control of the transverse mode is important for a practical realization of the single-mode device.

研究分野：半導体電子工学

キーワード：量子ドット 光アンプ 光利得 偏波無依存

1. 研究開始当初の背景

自己形成 InAs/GaAs 量子ドット(QD)を半導体光増幅器(SOA)に利用することにより、光ファイバーアンプでは対応できない波長帯域での広帯域増幅や超高速変調・波長変換などを実現することができる。特に、QDSOA は QD の先鋭な状態密度により高い飽和出力が可能であり、未開拓の波長帯を含む 1.0~1.3 μm の中・近距離通信波長帯で利用できるため、波長資源を有効に利用した次世代の超大容量光情報通信ネットワークにおいて実現が期待されている。一方、SOA には偏波に依存しない応答特性が要求されるが、従来の量子井戸を用いた SOA は井戸面内に大きな増幅利得を有するため、出力信号強度がランダムに変化してしまうという致命的な欠点がある。この問題は光導波路に対して平行成分である TE モードのモード利得のほうが、垂直成分である TM モードのモード利得よりも大きいため伝搬してくる信号光を正確に増幅できないというものである。われわれは 3 次元方向に閉じ込められている QD を利用することによって、近接積層などによって強い TM 利得を生み出し、偏波に依存しない SOA の実現を目指している。

われわれはこれまでに QDSOA の偏波無依存動作を実現するために自己形成 InAs/GaAs QD の近接積層構造に着目した研究を進めている。自己形成 InAs/GaAs QD は分子線エピタキシー(MBE)や有機金属気相成長法などで作製することができるが、一般に QD の形状は扁平であり、QD に加わる基板面内の二軸性圧縮ひずみにより、ちょうど量子井戸のように TE 偏光を有する伝導帯-重い正孔(HH)間の遷移のみ生じる。この吸収端における偏光を制御するには、TM 偏光成分を有する軽い正孔(LH)バンドを遷移に関与させる必要がある。^{10,11)}このために QD を近接に積層して、上下の量子ドット間の電子状態を結合し、価電子帯の HH と LH をミキシングさせる技術が非常に有効である。自己形成 QD は格子定数の異なる材料をエピタキシャル成長する際に、ひずみエネルギーを表面エネルギーとして開放することによ

てできる。このような QD をひずみが伝搬する程度に近接に積層すると、成長した QD の直上に次の量子ドットが形成される。これを繰り返すことで、歪による臨界膜厚の範囲内で積層方向に QD を自在に積み上げることが可能になる。

2. 研究の目的

われわれはこの近接積層 QD を用いて偏波無依存応答が得られる高利得な QDSOA デバイスの開発を目的としており、現在 30 層以上積層した QDSOA において TM モードの利得を十分に持つ QDSOA を実現している。しかし、活性層の QD 構造を最適化するだけでなく、SOA デバイス構造の最適化を行わなければ複数の横モードが存在して忠実な信号増幅を実現できない。マルチモード SOA ではモード毎に光信号パルスの伝搬速度が異なり、信号光パルスが歪んでしまい正確な増幅特性を得ることができなくなってしまう。そこで本研究では QDSOA の実用化に向け、SOA に望まれるシングルモード動作を実現するため、SOA デバイスのモードの評価と解析を行った。

3. 研究の方法

固体ソース MBE 装置を用い、40 層積層 InAs/GaAs QDs を活性層に導入した QDSOA を作製した。 n^+ -GaAs(001) 基板の上に Si をドーブした n^+ -GaAs バッファ層を 150 nm 成長した後に 1 μm の $n\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ クラッド層 ($5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) を基板温度 550°C で成長した。40 層積層 InAs/GaAs QD 構造を有する活性層は基板温度 480°C で成長した。活性層厚は 400 nm であり、初層の InAs QD は成長速度 0.04 ML/sec で初層を 2.0 ML、2 層目以降を 1.4 ML の供給量で成長し、10 sec の成長中断後に GaAs 中間層は成長速度 0.8 ML/sec で 4 nm 成長した。2 層目以降の InAs QD は多層積層に伴うひずみの拡がりを抑制するため、1.4 ML と InAs 供給量を減少させて成長した。活性層成長後には基板温度を 500°C とし、Be をドーブした 600 nm の $p\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ クラッド層 ($2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) と 400 nm の $p^+\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ クラッド層 ($1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) を成長させた。

3)を成長することによりダブルヘテロ構造を形成した。これにより活性層へキャリアと光を閉じ込めることが可能となり、最後に 150 nm の p⁺-GaAs コンタクト層を成長した。

作製した試料に電極、保護膜をつけ、素子長 600 μm、導波路幅 5, 11 μm のリッジ型導波路を有する QDSOA デバイスを作製した。導波路方向は[-110]方向であり、デバイス端面にはエレクトロルミネッセンス(EL)から利得を解析するために 83%と 97%の高反射コーティングを施し、Fabry-Perot 共振器構造を形成した。

4. 研究成果

4.1 ELスペクトル特性

作製した QDSOA デバイスの EL 測定を行った。EL 測定では、ペルチェ素子を用いて QDSOA デバイスの温度を 21°C に制御し、波長分解能約 40 pm の光スペクトルアナライザ (OSA) を用いて観測した。Fig.1 (a) に素子長 600 μm、導波路幅 5 μm のデバイスでの注入電流量 800 A/cm² における TE モードの EL スペクトルを示す。また Fig.1 (b) には Fabry-Perot 共振器におけるシングルモードスペクトルのシミュレーション結果を示す。今回用いた QDSOA の QD の密度は小さく、埋め込み材料の GaAs の屈折率はほとんど変化しないと仮定して、スペクトルシミュレーションでは QD の存在は計算に反映させていない。

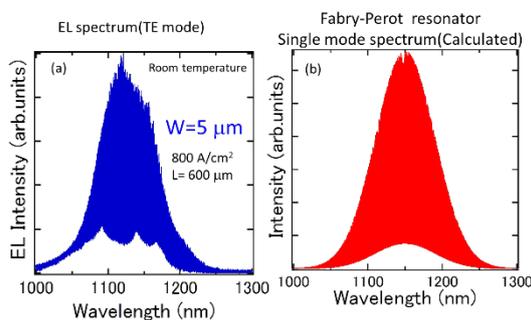


図1

Fig.1 (a)と1 (b)を比較すると、実験で得た干渉スペクトルのボトムの形状はシングルモードスペクトルの計算結果と明らかに異なる。これは SOA デバイス動作に複数のモードが寄与してマルチモードで動作していることが原因であると考えら

れる。次章ではこのことを明らかにするために横モードの解析を行った。

4.2 等価屈折率法

SOA デバイスのモード解析には等価屈折率法を用いた。これは縦と横の二方向に光を閉じ込める 3次元導波路のモードを近似的に解析できる手法である。解析では、まずリッジ部分とそれ以外の領域に分け、縦方向のみの光閉じ込めを考慮したスラブ型導波路を考えた。スラブ型導波路は活性層厚と屈折率を与えることにより、導波路モードを求めることができる。さらに、クラッド層に染み出しながら導波路を伝搬する光の感じる平均的な屈折率を表す等価屈折率 n_{eff} を求めることができる。次にこの n_{eff} を有する媒質のスラブ型導波路として横方向に閉じ込められた光の導波モードを求め、この方法により、縦方向と横方向に閉じ込められた光の導波モードを求めることができる。この等価屈折率法を用いて SOA デバイスのモード解析を行った。モード解析に用いた等価屈折率モデルを Fig.2 に示す。活性層厚は 400 nm とし、活性層 (GaAs)、クラッド層 (AlGaAs)、絶縁層 (SiO₂) の屈折率をそれぞれ 3.431, 3.314, 1.5 とした。等価屈折率法を用いた導波路幅に対するモード解析結果を Fig.3 に示す。これにより、導波路幅 5 μm では 4 つ、11 μm では 9 つのモードが存在していることがわかる。また導波路幅を小さくすることで、存在できるモード数を減少させることができ、1.28 μm にまで導波路幅を狭めるとシングルモード動作が実現できることを示唆している。また各モードでは等価屈折率が異なることが明らかとなった。このように等価屈折率の異なる複数のモードの光が伝搬している場合、観測される EL スペクトルがどのような形状となるのかシミュレーションを行った。

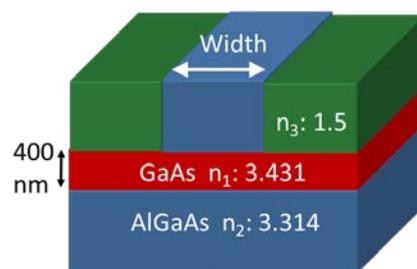


図2

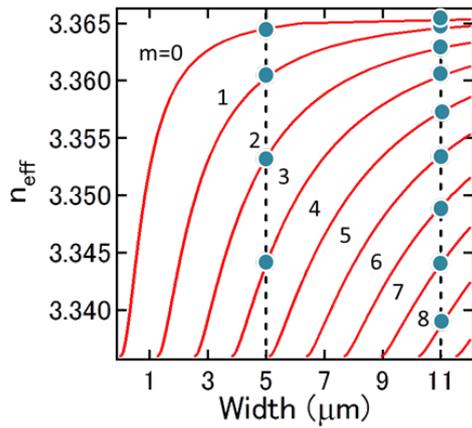


図3

4. 3 スペクトルシミュレーションと実験結果との比較

Fabry-Perot 共振器から放出される光強度は次式で与えられる。

$$I_m = \frac{(1 - R_1)I(\lambda)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{gL})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} e^{gL} \sin^2(n_{eff,m} k_0 L)} \quad (1)$$

ここで g はモード利得, R は反射率, L は素子長, n_{eff} は等価屈折率, k_0 は波数, λ は波長を示す. \sin^2 の項が共振を表す項であり, スペクトルに干渉縞を生じさせる. モードによってこの項の等価屈折率 n_{eff} が異なるため, 各モードは個々の共振器長と共振間隔を持つことになる. これにより, 観測される光強度は各モードの光強度の足し合わせで表現でき, 次式のようになる.

$$I_{total} = I_{m=1} + I_{m=2} + I_{m=3} + \dots \quad (2)$$

Fig.4 にスペクトルシミュレーションの結果を示す. ここでは, 各モードの光強度は等しいとし, 中心周波数 1150 nm の Gaussian とし, 反射率は 0.97 と 0.83, モード数は 4 とし, モード利得 g は -5 cm^{-1} , 素子長は $600 \text{ }\mu\text{m}$, 導波路幅は $5 \text{ }\mu\text{m}$ とした. この計算で用いた導波路幅では Fig. 3 から予想されるようにマルチモード動作をする. これにより, シングルモードスペクトルには見られなかったような構造が干渉スペクトルのトップとボトムに現れている. これは Fig.1(a) に示した QDSOA デバイスの EL スペクトルで観察され他ものと類似しており, 実験で得た複雑なスペクトル構造はマルチモードによる結果であることがわかった.

導波路幅が EL スペクトルに及ぼす影響を明らかにするために, 上で示した $5 \text{ }\mu\text{m}$ と同様に導波路幅 $11 \text{ }\mu\text{m}$ についてスペクトルシミュレーションを行った. Fig.5 (a) に導波路幅 $5 \text{ }\mu\text{m}$, $11 \text{ }\mu\text{m}$ のデバイスのスペクトルシミュレーション結果を示す. ここで, モード利得は -5 cm^{-1} , モード数は導波路幅 $5 \text{ }\mu\text{m}$ のデバイスでは 4, 導波路幅 $11 \text{ }\mu\text{m}$ のデバイスでは 9 とした. Fig.5 (b) には注入電流密度 800 A/cm^2 で計測した EL スペクトルを示す.

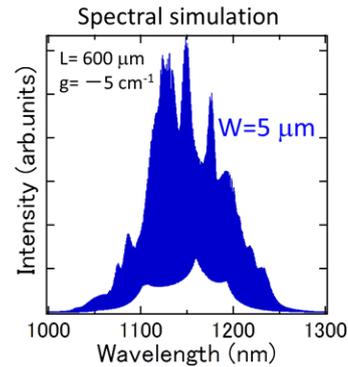


図4

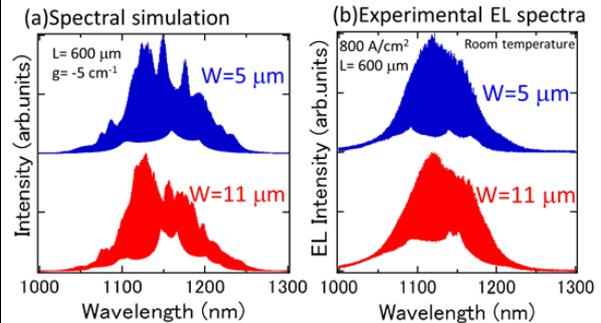


図5

これらを比較すると, シミュレーションと実験結果の双方で導波路幅 $11 \text{ }\mu\text{m}$ の場合でも導波路幅 $5 \text{ }\mu\text{m}$ と同様に干渉スペクトルのボトムの形状に複数のピークが見られる. また, 導波路幅が広くなるとピークの数が増え, ボトム全体が上昇している. これは第 4 章で議論を行った横モード解析結果を反映し, 導波路内に存在しているモード数が増加しているためであり, マルチモード動作の特徴である. 一方, 干渉スペクトルのボトムの形状はシミュレーションで良く再現できたが, トップの形状には違いが見られた. これはシミュレーションの条件をどのモード光も同じ強度であると仮定したが, 実際にはモードによって伝搬定数が異なり, 導波路への閉じ込め係数が異なるため, クラッド層への染み出しの小さ

い 0 次の横モード光強度が最大となるためである。Fig.6 に基本横モード ($m=0$) の光強度を $I(\lambda)$ 、高次横モード ($m=1\sim3$) の光強度を $0.4 I(\lambda)$ とした時のスペクトルシミュレーションの結果を示す。ここで、モード利得 g は -5 cm^{-1} 、素子長は $600 \mu\text{m}$ 、導波路幅は $5 \mu\text{m}$ とした。このモードの強度を調整したシミュレーション結果は、各モードの光強度を同等としたスペクトルシミュレーションである Fig.4, Fig.5(a) よりも、実験結果を相対的に良く再現しており、ボトムだけでなくトップのスペクトル形状も実験結果に近づいている。この結果は、マルチモードで動作する QDSOA では基本モードへの引き込みが生じていることを示している。

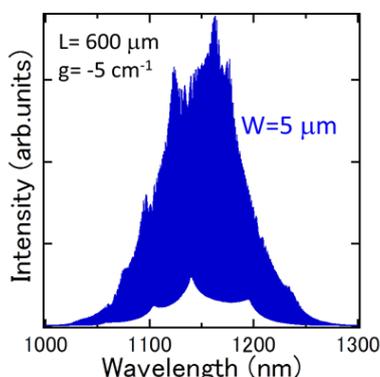


図6

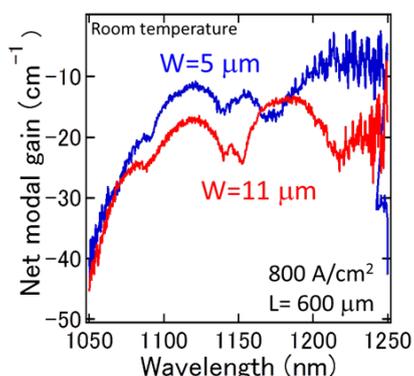


図7

以上の結果より、シングルモードで動作する QDSOA の実現のためには、高い注入電流によって生じるモードの引き込みを利用するか、あるいは導波路幅を $1.28 \mu\text{m}$ 程度にまで狭くすることが必要であると結論することができる。

最後に EL スペクトルから Hakki-Paoli 法を用いて利得スペクトルの導出を行った。Hakki-Paoli 法と

は Fabry-perot 共振器における導波路放出光から得られる干渉縞の最小値と最大値の比から利得スペクトルを解析する手法である。モード利得 g は次式より得られる。

$$g = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{\frac{1}{\gamma^2 - 1}}{\frac{1}{\gamma^2 + 1}} \right) + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \quad (3)$$

ここで g はモード利得、 R は反射率、 L は素子長を示し、 γ は導波路放出光から得られる干渉縞の最小値と最大値の比を示す。Fig.7 に Fig.5 (b) で得られた EL スペクトルに対して Hakki-Paoli 法を用いて解析した利得スペクトルを示す。導波路幅によらず、マルチモードの EL スペクトルの影響により利得スペクトルでも複数のピーク構造が現れた。導波路幅が異なると導波路内でのモードの影響が異なるため、利得スペクトルでピークとなる波長帯も異なる。そのため利得スペクトル構造は複雑になり変化は一様ではないが、おおむね導波路幅 $5 \mu\text{m}$ の方が $11 \mu\text{m}$ よりも導波路内に存在するモード数が少ないため利得の値が大きくなっている。このように、マルチモードは利得スペクトルの形状だけでなく利得値にも大きく影響を与えるため、大きな利得を有する QDSOA を実現するにはシングルモード動作の実現が不可欠である。以上のような等価屈折率法を用いた導波モード解析より、伝搬モードを制御するには導波路幅の制御が重要なカギを握っていることが明らかになった。これはシングルモードで動作する高利得 QDSOA デバイス実現への重要な指標である。

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 16 件)

- ① T. Kita, M. Suwa, T. Kaizu, and Y. Harada, Polarization-Insensitive Optical Gain Characteristics of Highly Stacked InAs/GaAs Quantum Dots, J. Appl. Phys.、査読有、Vol. 115, No. 23、2014、233512-1~5 DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4884228>
- ② Y. Bessho, Y. Harada, T. Kita, R. Taguchi, and H. Yasuda, Control of Stacking Direction and Optical Anisotropy in InAs/GaAs Quantum Dots by In Flux, J. Appl. Phys.、査読有、

Vol. 114、2013、033517-1~5
DOI: 10.1063/1.4815936

- ③ A. Takahashi, T. Ueda, Y. Bessho, Y. Harada, and T. Kita, One-Dimensional Miniband Formation in Closely Stacked InAs/GaAs Quantum Dots, Phys. Rev. B、査読有、Vol. 87、2013、235323-1~6
DOI: 10.1103/PhysRevB.87.235323
- ④ H. Tanaka, O. Kojima, T. Kita, and K. Akahane, Enhancement of Optical Anisotropy by Interconnection Effect along Growth Direction in Multistacked Quantum Dots, Jpn. J. Appl. Phys.、査読有、Vol. 52、2012、012001-1~4
DOI: 10.7567/JJAP.52.012001
- ⑤ T. Kita, T. Maeda, and Y. Harada, Carrier Dynamics of the Intermediate State in InAs/GaAs Quantum Dots Coupled in a Photonic Cavity Under Two-Photon Excitation, Phys. Rev. B、査読有、Vol. 86、2012、035301-1~7
DOI: 10.1103/PhysRevB.86.035301
(他11件)

[学会発表] (計 46 件)

- ① Y. Harada, Intraband Carrier Dynamics in Self-Assembled Quantum Dots for Infrared Optical Devices, EMN Fall Meeting, 2014.12.7-10, Florida (USA)
- ② T. Kita, Carrier Dynamics and Two-Step Photon Absorption in InAs/GaAs Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells, High-Efficiency Materials for Photovoltaics 2014, 2014.7.21-22, London (UK)
- ③ 喜多 隆, 量子ドットを利用した光ハーベスト、電気情報通信学会 次世代ナノ技術に関する時限研究専門委員会 第4回研究会、2014.1.24、(株)島津製作所関西支社 (大阪)
- ④ 喜多 隆, 量子ドット3次元構造のボトムアップ成長と物性制御、第12回インテリジェント・ナノプロセス研究会、2012.12.20、トラストシティカンファレンス仙台 (宮城)
- ⑤ 喜多 隆, III-V族量子構造を用いたナノフォトニクス応用、シリコン・フォトニクス時限研究専門委員会第17回研究会、2012.7.12-13、神戸大学 (兵庫)
(他41件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 半導体装置及び半導体装置の製造方法
発明者: 喜多 隆、原田 幸弘、別所 侑亮、

保田 英洋
権利者: 同上
種類: 特許、PCT
番号: 特願 2012-198903
出願年月日: 2012年9月10日
国内外の別: 国内
番号: PCT/JP2013/005332
出願年月日: 2013年9月9日
国内外の別: 国外

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-photonics/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

喜多 隆 (KITA TAKASHI)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10221186

(2)研究分担者

原田 幸弘 (HARADA YUKIHIRO)
神戸大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 10554355