近接積層 InAs/GaAs 量子ドット半導体光アンプの光導波モード解析

諏訪 雅也* 大橋 知幸* 安達 貴哉*
海津 利行* 原田 幸弘* 喜多 隆*

Analysis of Optical Waveguide Mode in Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifiers

by

Masaya SUWA*, Tomoyuki OHASHI*, Takaya ANDACHI*,
Toshiyuki KAIZU*, Yukihiro HARADA* and Takashi KITA*

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- μm -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 μm 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.

Key words:

Molecular beam epitaxy, Closely-stacked InAs/GaAs QDs, Semiconductor optical amplifier, Effective refractive index

1 緒言

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.^{1,2)}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 Transverse-electric (TE) モードのモード利得のほうが,垂直成分である Transverse-magnetic (TM) モードのモード利得よりも大きいために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.^{3)~15)}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.¹⁶⁾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ってできる.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.

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^{14),15)}.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。

2 結晶成長とデバイス構造の作製

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 をドーピングした 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 をドーピングした 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 コントクト層を成長した。

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.^{14), 15)}

3 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/cm^2 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。

Fig.1 (a) と (b) を比較すると, 実験で得た干渉スペクトルのボトム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 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る. 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

Fig.1 (a) Experimental TE-mode EL spectrum of 40-stacked QDSOA device and (b) calculated single-mode spectrum of Fabry-Perot resonator. Cavity length and waveguide width were 600 and 5 μm , respectively. Device temperature was controlled at 21°C. Injection current density was 800 A/cm^2 .

Fig.2 Illustration of a modal analysis model. ($n_{\text{GaAs}}=3.4341$, $n_{\text{AlGaAs}}=3.314$, $n_{\text{SiO}_2}=1.5$)

Fig.3 Modal analysis as a function of the waveguide width using an equivalent refractive index technique.

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。

5 スペクトルシミュレーション

Fabry-Perot 共振器から放出される光強度は次式で与えられる。

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

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。sin² 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。

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

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 μm、導波路幅は 5 μm 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。

6 導波路幅を変化させた時の

スペクトルシミュレーションと実験結果の比較

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 μm と同様に導波路幅 11 μm 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 μm, 11 μm 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 μm のデバイスでは 4、導波路幅 11 μm のデバイスでは 9 とした。Fig.5 (b) には注入電流密度 800 A/cm² で計測した EL スペクトルを示す。

Fig.4 Calculated EL Spectrum of QDSOA with 600-μm-cavity length and 5-μm-waveguide width. Modal gain and mode number used in this calculation were -5 cm⁻¹ and 4, respectively.

Fig.5 (a) Calculated EL spectra and (b) experimental EL spectra measured at an injection current density of 800 A/cm² for QDSOA with 5- and 11-μm-waveguide width and 600-μm-cavity length. Modal gain used in this calculation was -5 cm⁻¹.

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 μm の場合でも導波路幅 5 μm 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、導波路幅が広が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 μm、導波路幅は 5 μm 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

Fig. 6 Calculated EL spectrum of QDSOA with 600-μm-cavity length and 5-μm-waveguide width. Modal gain used was -5 cm^{-1} . The optical intensity of each mode was $I(\lambda)(m=0)$ and $0.4I(\lambda)(m=1\sim3)$.

Fig. 7 Net modal gain spectra measured at an injection current density of 800 A/cm^2 of QDSOA with 5- and 11-μm-waveguide width and 600-μm-cavity length.

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。

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¹⁷⁾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。

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

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。

7 結 言

MBE を用いて導波路幅 $5, 11 \mu\text{m}$ 、素子長 $600 \mu\text{m}$ の 40 層積層 InAs/GaAs QDSOA デバイスを作製し、伝搬 EL スペクトルと利得スペクトルのモード解析を行った。スペクトルシミュレーションにより導波路幅 $5, 11 \mu\text{m}$ の両方で QDSOA デバイスはマルチモードとなっていることが明らかとなった。さらに、基本モードの光強度に重みをもたせたスペクトルシミュレーションより、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が明らかになった。

また、Hakki-Paoli 法を用いた利得スペクトル解析によりマルチモードの QDSOA では利得スペクトルに複数のピーク構造が現れた。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。

QDSOA デバイス加工にご協力いただきました富士通研修所江川満 様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) M. Sugawara, United State Patent, US 6, 590, 701 (2003).
- 2) M. Sugawara, N. Hatori, M. Ishida, H. Ebe, Y. Arakawa, T. Akiyama, K. Otsubo, T. Yamamoto and Y. Nakata, "Recent progress in self-assembled quantum-dot optical devices for optical telecommunication: temperature-insensitive 10Gbs-1 directly modulated lasers and 40 Gbs-1 signal-regenerative amplifiers", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.38, No.13, pp.2126-2134 (2005).
- 3) T. Kita, O. Wada, H. Ebe, Y. Nakata and M. Sugawara, "Polarization-independent photoluminescence from columnar InAs/GaAs self-assembled quantum dots", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 41, Part.2, L1143 (2002).
- 4) P. Jayavel, H. Tanaka, T. Kita, O. Wada, Y. Nakata, T. Akiyama, H. Ebe, M. Sugawara, J. Tatebayashi and Y. Arakawa, "Control of InGaAs capping layer induced optical polarization in edge-emitting photoluminescence of InAs quantum dots", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 4B, pp. 1978-1980 (2004).

- 5) P. Jayavel, T. Kita, O. Wada, Y. Nakata, T. Akiyama, H. Ebe, M. Sugawara, J. Tatebayashi and Y. Arakawa, "Control of optical polarization anisotropy in edge emitting luminescence of InAs/GaAs self-assembled quantum dots", *Applied Physics Letters*, Vol. 84, No. 11, pp. 1820-1822 (2004).
- 6) P. Jayavel, T. Kita, O. Wada, H. Ebe, M. Sugawara, Y. Arakawa, Y. Nakata and T. Akiyama, "Optical polarization properties of InAs/GaAs quantum dot semiconductor optical amplifier", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 44, No. 4B, pp 2528-2530 (2005).
- 7) T. Kita, N. Tamura, O. Wada, M. Sugawara, Y. Nakata, H. Ebe and Y. Arakawa, "Artificial control of optical gain polarization by stacking quantum dot layers", *Applied Physics Letters*, Vol. 88, 211106-1~3 (2006).
- 8) O. Kojima, H. Nakatani, T. Kita, O. Wada, K. Akahane and M. Tsuchiya, "Photoluminescence characteristics of quantum dots with electronic states interconnected along growth direction", *Journal of Applied Physics*, Vol. 103, 113504-1~5 (2008).
- 9) T. Inoue, M. Asada, N. Yasuoka, O. Kojima, T. Kita and O. Wada, "Polarization control of electroluminescence from vertically stacked InAs/GaAs quantum dots", *Applied Physics Letters*, Vol. 96, 211906-1~3 (2010).
- 10) Y. Ikeuchi, T. Inoue, M. Asada, Y. Harada, T. Kita, E. Taguchi and H. Yasuda, "Multidirectional observation of photoluminescence polarization anisotropy in closely stacked InAs/GaAs quantum dots", *Applied Physical Express*, Vol.4, 062001 (2011).
- 11) M. Usman, T. Inoue, Y. Harada, G. Klimeck and T. Kita, "Experimental and atomistic theoretical study of degree of polarization from multilayer InAs/GaAs quantum dot stacks", *Physical review B*, Vol.84, 115321 (2011).
- 12) O. Kojima, N. Tobita, T. Kita and K. Akahane, "Dynamics of adobe-barrier state excitons in multi-stacked quantum dots", *Journal of Applied Physics*, Vol. 110, 093515-1~4 (2011).
- 13) A. Takahashi, T. Ueda, Y. Bessho, Y. Harada and T. Kita, "One-dimensional miniband formation in closely stacked InAs/GaAs quantum dots", *Physical Review B*, Vol. 87, 235323-1~6 (2013).
- 14) M. Suwa, A. Takahashi, T. Ueda, Y. Bessho, Y. Harada and T. Kita, "Polarization controlled emission from closely stacked InAs/GaAs quantum dots", *Physica Status Solidi C*, Vol. 10, No. 11, pp. 1492-1495 (2013).
- 15) T. Kita, M. Suwa, T. Kaizu and Y. Harada, "Polarization-insensitive optical gain characteristics of highly stacked InAs/GaAs quantum dots", *Journal of Applied Physics*, Vol. 115, No. 23, pp.233512-1-5 (2014).
- 16) T. Saito, H. Ebe, Y. Arakawa, T. Kakitsuka and M. Sugawara, "Optical polarization in columnar InAs/GaAs quantum dots: 8-band k·p calculations", *Physical review B*, No.77, 195318 (2008).
- 17) B. Hakki and T. L. Paoli, "Gain spectra in GaAs double-heterostructure injection lasers", *Journal of Applied Physics* No.46, 1299 (1975).