InGaAs/AlGaAs Quantum Wire DFB Laser by One-Time Selective MOCVD on Ridge Substrate

Yasuyuki Takasuka Member (Shibaura Institute of Technology, y-takasuka@aist.go.jp)

Kenji Yonei Member (Shibaura Institute of Technology)

Mutsuo Ogura Member (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Keywords : Quantum wire, DFB laser, V-groove grating ridge substrate, one-time selective MOCVD, trapezoidal growth profile

Quantum wires (QWRs) and quantum dots are promising for future optoelectronic devices, because their steep density of states and carrier confinement mechanism result in a large differential gain and a low threshold current. But uniformity and high-density of quantum structures are needed for their primary performance.

Distributed feedback (DFB) laser produced single longitudinal mode by the gratings of the light-waveguide or the active region.

Although it is necessary to form quantum-structures and DFB-structures inside the semiconductor laser, conventional laser needs complex multiple regrowth and etching processes. Multiple regrowth processes induce some problems that increase process-cost, and deteriorate crystal quality.

Figure 1 shows the schematic drawing of InGaAs/AlGaAs quantum wire DFB laser. In this study, we demonstrate a QWR-DFB laser on a ridge substrate with a submicron grating. Here, we used one-time selective MOCVD to form a ridge waveguide with a BH structure and a QWR array for gain-guided

DFB LD without additional etching or regrowth process.

A ridge waveguide LD with a quasi-BH structure was obtained by selective metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD). The orientation dependence of crystal growth led to the formation of a trapezoidal cross section with thin sidewalls, and a low-capacitance optical waveguide and a carrier confinement structure were realized at the same time.

Figure 2 shows the spontaneous emission and lasing spectra of the QWR-DFB laser. We observed lasing emission at 811.9 nm when the current is 14.9 mA. A stable single longitudinal mode was preserved until $3 I_{th}$, after which another mode emerged at a high drive current at 813.6 nm. This suggests a complex-coupled DFB-mode operation. The coupled coefficient is estimated to be higher than 67 cm^{-1} from the wavelength difference between two peaks.

Fig. 1. Schematic drawing of InGaAs/AlGaAs quantum wire DFB laser

Fig. 2. Spontaneous emission and lasing spectrum of InGaAs/AlGaAs quantum wire DFB laser under pulsed condition

リッジ基板上の一回の選択 MOCVD による InGaAs/AlGaAs 量子細線 DFB レーザー

正員 高須賀庸行* 正員 米井 健治*
非会員 小倉 睦郎**

InGaAs/AlGaAs Quantum Wire DFB Laser by One-Time Selective MOCVD on Ridge Substrate

Yasuyuki Takasuka*, Member, Kenji Yonei*, Member, Mutsuo Ogura**, Non-member

A quasi-buried hetero-structure (BH) quantum wire (QWR) distributed feedback (DFB) laser was realized by one time selective metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) on a ridge substrate with a sub-micron grating. One time selective MOCVD growth forms ridge waveguide with BH structure and a QWR array for gain guided DFB LD without additional etching or re-growth process. The threshold current is 15mA, and the threshold current density is 850A/cm². A stable single longitudinal mode was preserved until 3 I_{th}, after which another mode emerged at higher drive current at 813.6nm. This suggests a complex coupled DFB mode operation. Elimination of the re-growth step also enlarges the selection of material for extended wavelength and operational temperature.

キーワード：量子細線，分布帰還型レーザー，V溝グレーティングリッジ基板，一回の選択 MOCVD，台形型成長断面

Keywords：Quantum wire, DFB laser, V-groove grating ridge substrate, one-time selective MOCVD, trapezoidal growth profile

1. はじめに

光加入者網の整備（FTTH：fiber to the home）に伴い、インターネットのトラフィックは 2005 年現在、年率 200-300% で増加している。長距離・大容量伝送の需要の増加には際限がないが、加入者レベルに対して普及させるためには、要求性能を満たす光デバイスを、簡便に製造し、提供することが求められている。

量子ナノ構造は、キャリアの状態密度を急峻にし、利得が特定のエネルギー準位に集中する結果、半導体レーザーの発振の低閾値化につながる事が理論的に予測され、量子細線・量子ドットなど量子構造を用いた半導体レーザーが、これまで研究されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。しかし量子構造が本来の特性を発揮するには形状の均一性と高密度性が要求される。量子ナノ構造の量子レベルの均一性を確保するためには、1 原子層（0.28nm）レベルでの加工精度が必要になり、従来のリソグラフィ技術の精度では不十分である。

一方、長距離・大容量の伝送を行うためには、光ファイ

バーの波長分散による光パルスの広がり为了避免するため、単一波長半導体レーザーが求められる。分布帰還型（DFB：Distributed feedback）レーザーは、光導波路あるいは活性領域に回折格子を形成するもので、これにより単一モード発振が得られる。

そこで、このような量子ナノ構造や回折格子を半導体レーザー内に作り込む技術が必要となるが、これまでは、通常、複数回の結晶成長と中断・エッチングなどの煩雑なプロセスを必要としてきた⁽³⁾⁽⁴⁾。成長中断と再成長プロセスは、製造工程の煩雑化を招くとともに、再成長界面における結晶品質の劣化など様々な問題があった。また、最近、パッケージに冷却機構を持たない加入者系用の半導体レーザーとして、InGaAlAs 系材料が着目されているが⁽⁵⁾、従来の再成長を含む工程では、大気中で容易に酸化されやすい Al のような材料を用いることは困難であった。このような複数回の再成長を伴うプロセスが複雑なのは明らかであり、製造工程の簡素化のため、再成長が不要な作製方法が新たに望まれる。

そこで我々は、逆メサ構造を持つ V 溝グレーティング基板上の一回の選択 MOCVD によって低閾値の InGaAs/AlGaAs 量子細線 DFB レーザーを作製したので、それについて報告する。

* 芝浦工業大学

〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5

Shibaura Institute of Technology.,

3-7-5 Toyosu, Koutou-ku, Tokyo 135-8548

** 独立行政法人産業技術総合研究所

〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.,

1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568

Fig. 1. Schematic drawing of InGaAs/AlGaAs quantum wire DFB laser

2. 研究内容

図1はInGaAs/AlGaAs量子細線DFBレーザの模式図である。量子細線構造およびDFB構造を作製するため、まずGaAs(100)基板に対しV溝グレーティング形成およびリッジ構造形成を行う。次にMOCVD法によって $\text{Al}_{0.38}\text{GaAs}$ 層を導波路とする $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ 量子細線層を形成する。その後絶縁膜形成・電極膜蒸着を行い、へき開してレーザバーとする。

本研究の結果、V溝グレーティングリッジ基板に対する一回の結晶成長によって、量子細線構造、DFB構造、電流狭窄構造、導波路構造など各必要な要素を有するレーザを、プロセス上問題がある再成長を行うことなくしに簡便なプロセスで作製することが可能となる。

3. 作製プロセス

細線構造およびDFB構造を作製するため、まず基板に対し電子ビーム描画とウェットエッチングによりV溝グレーティング形成を行った。

ここでグレーティング周期と発振波長について考察する。導波路の屈折率を n 、DFBグレーティングの周期を d とすると、グレーティング一周期分の光学距離は nd となる。ブラッグ反射が起こるためには、波長の $1/2$ の整数(N)倍と nd が等しくなればよい。すなわち、

$$N \frac{\lambda}{2} = nd \quad \dots\dots\dots (1)$$

これよりブラッグ波長は

$$\lambda = \frac{2nd}{N} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

細線の密度およびDFB効果の点からはなるべくグレーティング周期が小さいことが望ましいが、その一方 $1\mu\text{m}$ 程度の厚い結晶成長をすると序々に断面形状が崩れ、細線およ

Fig. 2. SEM image (a), and cross sectional SEM image (b), of InGaAs/AlGaAs quantum wire DFB laser

びDFB構造を得ることが難しくなる。そこで本研究では次数 $N=3$ 、グレーティング周期 $d=360\text{nm}$ として試料を作製した。この場合文献(5)より波長 810nm 帯における $\text{Al}_{0.38}\text{GaAs}$ の屈折率を $n=3.39$ として計算すると、ブラッグ波長は $\lambda=813.6\text{nm}$ となる。

また横方向閉じ込めおよび電子ビーム描画時間短縮のためグレーティング幅は $6\mu\text{m}$ とした。

結晶の面方位によるエッチング速度の異方性により、図1に示すようなV溝形状が得られる。エッチング液には、GaAsに対して代表的な硫酸一過酸化水素一水溶液を用いた。

この液は組成によりエッチング速度および断面形状が変化することが知られているが、本研究では1:8:40の液を用いることにした。

さらに、同様の液にてリッジ形成を行った。

図2にリッジ基板上的V溝グレーティングの模式図とSEM像を示す。

中央の逆台形の上に周期 360nm のV溝グレーティングが形成されており、良好な形状の形状基板が作製できたことがわかる。

図3にMOCVD成長後のリッジストライプに沿った方向の量子細線DFBレーザの断面TEM像を示す。

V溝GaAs基板上に厚さ約 $1\mu\text{m}$ の $\text{Al}_{0.38}\text{GaAs}$ 層があり、さらにその上に $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ 量子細線構造が周期的に形成されているのがわかる。厚い $\text{Al}_{0.38}\text{GaAs}$ 成長のためV溝が鈍角化し $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ 量子細線はやや広く伸びた形となっている。

図4は断面TEM像の拡大図である。図4の縦方向に確認される線状のものはいわゆる垂直量子井戸とよばれるものであり、これはV溝構造によって $\text{Al}_{0.38}\text{GaAs}$ 中のAlの疎密が生じるためである。

その後、成長後の試料に対し電極作製プロセスを行った。熱CVDにより厚さ120nmの SiO_2 薄膜を形成し、BHFエッチングにより幅 $3.5\mu\text{m}$ のストライプ窓を開口した。そのときポリイミド塗布およびアッシングにより試料のリッジ側面部分を平坦化した。試料表面にp電極としてCr/Auを30nm/200nm、試料裏面にn電極としてAuGe/Ni/Auを100nm/80nm/200nm真空蒸着し、それぞれ 430°C と 440°C でアロイを行った。最後に、 $500\mu\text{m}$ と4mmのレーザーバーに加工した。両端面にコートは施していない。

4. 作製後の試料

図5は試料の $[0-1-1]$ 方向の断面SEMである。元々あった逆メサ型断面の上に、厚さ $2\mu\text{m}$ の成長がなされている。形状基板上の成長により、自己形成的に台形型成長断面が得られていることがわかる。図6は断面SEMの拡大図である。斜面において成長が起らずp-AlGaAs層が分断されているのがわかる。そのため、横方向への電流が遮断され電流狭窄が可能となる。

Fig. 3. Cross-sectional TEM image of quantum wire DFB laser along ridge stripe

Fig. 4. Enlarged cross-sectional TEM image of quantum wire DFB laser along ridge stripe

図7に30mA注入時のレーザーダイオードのニアフィールドパターンを示す。両脇の側面が非常に薄いため、注入された電流が有効に試料中央のリッジ部分に集中されているのがわかる。これによって本研究で意図した自己形成的な電流狭窄・導波路構造が実際に作製されていることが確認できた。

5. 測定結果

作製したInGaAs/AlGaAs量子細線DFBレーザーについて

Fig. 5. Cross-sectional SEM image of quantum wire DFB laser across ridge stripe

Fig. 6. Enlarged cross-sectional SEM image of quantum wire DFB laser across ridge stripe

Fig. 7. Near-field pattern of laser diode after being planarized using polyimide

て、室温においてパルス電流注入によりその特性を評価した。以下にその結果を示す。

図8に、本 InGaAs/AlGaAs 量子細線 DFB レーザーの、室温におけるパルス電流注入下での電流対光出力特性を示す。電流値がおおよそ 30mA 以上で光出力が急速に増大している。閾値電流は 15mA、閾値電流密度は $850\text{A}/\text{cm}^2$ である。またこの IL 特性より求められる微分量子効率 は $0.029\text{W}/\text{A}$ である。

図9に量子細線 DFB レーザーの自然放出および発振スペクトルを示す。電流値 14.9mA のときに波長 811.9nm のレーザー発振が得られ、これは先の計算によるブラッグ波長の値 813.6nm とよく一致している。安定な単一縦モードが閾値の3倍程度まで保持され、その後、高電流駆動時に波長 813.6nm において別のモードが現れた。これは複素結合 DFB モードを表していると考えられる。2つの波長間隔から結合係数は 67cm^{-1} と見積もられる。

Fig. 8. Current vs. light output characteristics of InGaAs/AlGaAs quantum wire DFB laser under pulsed condition

Fig. 9. Spontaneous emission and lasing spectrum of InGaAs/AlGaAs quantum wire DFB laser under pulsed condition

6. 結 論

逆メサ構造を持つ V 溝グレーティング基板上の一回の選択 MOCVD によって、低閾値の InGaAs/AlGaAs 量子細線 DFB レーザーを作製した。これによって半導体レーザーに必要な全ての構造を、より簡素に作製できるようになった。

成長速度の方位依存性により台形型断面が形成・電流経路が分断され、実際に電流狭窄の効果を確認することができた。

閾値は 14.5mA で、これは電流狭窄の効果が確実に働いたためと考えられる。また、発振スペクトルは波長 812nm 付近において閾値の3倍程度まで単一モードが維持され、その後新たなモードが現われた。

通常の埋め込み (BH) 構造を用いた DFB レーザーの場合は、4 回程度の再成長プロセスを必要とし、また、pn 逆接合を用いた電流阻止構造により素子の寄生容量が大きくなる欠点がある。一方、本レーザーは、形状基板上の1回の選択成長により量子細線 DFB レーザーを実現し、それにより、プロセスの簡素化が得られている。また再成長プロセスを含まないため、Al 組成を含むクラッド層、例えば InGaAs/InGaAlAs 系量子構造の採用により温度特性を改善することが可能となり、安価で高性能な量子細線 DFB レーザーが実現し、今後のファイバー・トゥ・ホーム (FTTH : Fiber to the Home) や車載用通信システムへの応用が可能となる。

本研究の一部は、文部科学省のナノテクノロジー総合支援プロジェクトの支援を受けて、(独)産業技術総合研究所ナノプロセッシング施設において実施されました。

(平成 18 年 10 月 11 日受付、平成 19 年 3 月 9 日再受付)

文 献

- (1) M. Walther, E. Kapon, C. Caneau, D. M. Hwang, and L. M. Schiavone : "InGaAs/GaAs strained quantum wire lasers grown by organometallic chemical vapor deposition on nonplanar substrates", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.62, No.18, pp.2170-2172 (1993)
- (2) X. L. Wang, M. Ogura, and H. Matsuhata : "Temperature Dependent Photoluminescence Investigation of AlGaAs/GaAs Quantum Wires Grown by Flow Rate Modulation Epitaxy", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.67, No.24, pp.3629-3631 (1995)
- (3) Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, T. Inoue, H. Hosomatsu, and H. Iwaoka : "Purely gain-coupled distributed feedback semiconductor lasers", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.56, No.17, pp.1620-1622 (1990)
- (4) W. T. Tsang, F. S. Choa, M. C. Wu, Y. K. Chen, R. A. Logan, S. N. G. Chu, A. M. Sergent, P. Magill, K. C. Reichmann, and C. A. Burrus : "Long wavelength InGaAsP/InP distributed feedback lasers grown by chemical beam epitaxy", *J. Crystal. Growth* 124 pp.716-722 (1992)
- (5) K. Takemasa, T. Munakata, M. Kobayashi, H. Wada, and T. Kamijob : "1.3- μm AlGaInAs-AlGaInAs strained multiple-quantum-well lasers with a p-AlInAs electron stopper layer", *IEEE Photon. Tech. Lett.*, Vol.10, pp.495-497 (1998)
- (6) H. C. Casey, Jr., D. D. Sell, and M. B. Panish : "Refractive index of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ between 1.2 and 1.8eV", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.24, No.2, pp.63-65 (1974)

高須賀 庸 行

(正員) 2006 年芝浦工業大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。現在、芝浦工業大学ポスドク研究員および産業技術総合研究所協力研究員として、量子細線 DFB レーザーに関する研究に従事。また 2006 年より地域新生コンソーシアム研究開発事業「埼玉オプトプロジェクト」に従事。

小 倉 睦 郎

(非会員) 1980 年東京大学大学院工学系研究科電子工学専門課程修了。工学博士。同年電子技術総合研究所（現産業技術総合研究所）入所。化合物半導体光・電子デバイスの研究に従事。1998-2002 年 JST 戦略基礎プロジェクト (Crest), 2004-2009 (予) 総務省産学官連携先端技術開発プロジェクト (Scope) 代表。

米 井 健 治

(正員) 1963 年芝浦工業大学工学部電気工学科卒業。同年同大学工学部電子工学科専任助手。1970 年同専任講師。1987 年同助教授。1992 年同教授。2007 年 3 月同大学定年退職。現在は（独）産業技術総合研究所客員研究員，文教大学教育学部理科専修非常勤講師。芝浦工業大学在籍中は CCD，太陽電池セル，In 酸化物透明電極，金属細線，半導体量子細線およびそれらの応用の研究に従事。現在は経済産業省新生地域コンソーシアムの研究に従事。工学博士（京都大学）。応用物理学会，電子情報物理学会，IEEE (SM) 各会員。