

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560047

研究課題名（和文） 高効率な微小リング共振器を有するマイクロチューブレーザの開発

研究課題名（英文） Development of high efficient semiconductor microtube-lasers containing micro-ring resonators

研究代表者

大谷 直毅 (OHTANI NAOKI)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：80359067

研究成果の概要（和文）：半導体マイクロチューブの壁内部に活性層となる量子井戸あるいは量子ドットを有する構造は微小リング共振器となるため、高効率で低しきい値な半導体レーザの開発を目指した。マイクロチューブの作製技術、数値シミュレーションから研究を行い、その結果、ウエットエッチングの最適条件、レーザ発振の動作モード、基板での光吸収の悪影響などに関して新しい知見を得た。

研究成果の概要（英文）：Semiconductor microtubes containing quantum wells or quantum dots in the micro-ring resonators are the candidate for developing novel high efficient and low threshold lasers. We performed the evaluation of the fabrication condition of the microtubes and numerical simulation. As a result, we found the best condition of the wet-etching, oscillating modes, the bad influence of the optical absorption in substrates on realizing lasing

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：マイクロチューブ、量子井戸、量子ドット、FD-TD シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

半導体マイクロチューブは Prinz (ロシア)らにより 1999 年にその作製技術が発表された。当初は電気伝導特性の評価が主であったが、Kipp (ドイツ) のグループから発光特性の研究が開始された。同時期に共同研究者である細田らが時間領域差分法 (Finite-difference time-domain; FD-TD) によるシミュレーションを用いたレーザ発振モードの解析が開始され、マイクロチューブ

の壁面を周回するレーザ発振モード、いわゆる whispering gallery mode (WGM) の存在が明らかとなった。これにより微小リングが共振器となるため高効率で低しきい値な半導体レーザが開発される可能性が示された。このレーザはまったく新しい 3 次元構造であるため、従来見られなかった多用途なレーザ発振動作が期待される。

2. 研究の目的

前述のように、新しい3次元構造から生じる新規なレーザ発振を実現するため、マイクロチューブ作製条件の最適化、発振モードの解析を実験および数値解析の両面から実行する。

3. 研究の方法

マイクロチューブ作製はウエットプロセスによって行われる。溶液はフッ酸の水溶液であるから、その濃度とマイクロチューブ壁内の構造との相関を調べる。とくに活性層内部が量子井戸あるいは量子ドットと異なる場合、その作製条件の違いについて検討する。また導波路型レーザでは量子ドットを積層して発振に必要な活性層の体積を確保するのが一般的な方法である。従って、活性層となる量子ドットを積層した場合、マイクロチューブ壁の厚みが増すためにチューブ化のウエットプロセス条件が困難になることが予想される。これらの問題を解決することが目的である。実験に使用した素子構造の断面図の例を図1に示す。図1右が2層積層の量子ドットである。積層の分だけマイクロチューブ壁となるフィルムの厚さが増すことになる。

GaAs (10nm)	GaAs (5 nm)
Al _{0.7} Ga _{0.3} As (10 nm)	Al _{0.7} Ga _{0.3} As (10 nm)
GaAs QW (12ML)	GaAs (5nm)
Al _{0.7} Ga _{0.3} As (5nm)	GaAs (5nm)
In _{0.19} Ga _{0.81} As (15~20 nm)	Al _{0.7} Ga _{0.3} As (10 nm)
Al _{0.52} Ga _{0.48} As/AlAs × 100 (0.4nm/0.4nm)	In _{0.19} Ga _{0.81} As (20~30 nm)
GaAs (200nm)	Al _{0.52} Ga _{0.48} As/AlAs × 100 (0.4nm/0.4nm)
GaAs substrate	GaAs (200nm)
	GaAs substrate

図1: サンプル構造例。(左) 量子井戸、および(右) 積層量子ドットを活性層に含む。

WGMは光が周回するため、周回軌道の長さが波長の整数倍のモードが生じることになる。このとき、光の電場の向きがマイクロチューブ壁に垂直方向、あるいは壁に平行方向の2通りのモードの可能性が考えられる。従って、光パルスがマイクロチューブ壁内を周回するとき、2通りの電界分布の伝搬の様子をFD-TDシミュレーションして、発振モードを解析する。

また、光の周回中に基板での光吸収が問題となることが分かってきた。そのため、マイクロチューブを基板から浮かせる作製技術についても検討をはじめることとした。

4. 研究成果

4.1 マイクロチューブ作製技術

図2は量子井戸を含むマイクロチューブを作製しその電子顕微鏡写真である。基板の劈

開面から選択エッチングがはじまり、基板中央へフィルムが巻き上がり、綺麗なマイクロチューブが作製されたことが分かる。このときのフッ酸と純粋の最適な混合比も明らかとした。

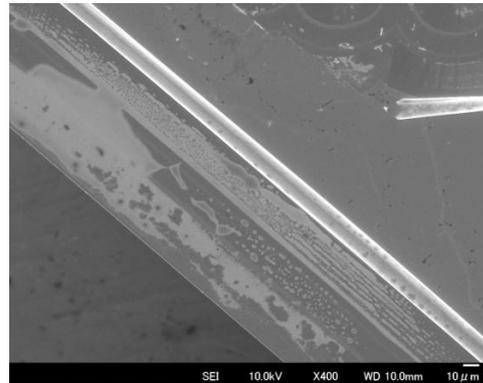


図2: 量子井戸を含むマイクロチューブの電子顕微鏡写真

図3は積層量子ドットを含むマイクロチューブの作製結果である。基板劈開面からではなく、基板表面から選択エッチングが始まっていることが分かる。この理由は、量子ドットの積層によりマイクロチューブ壁が厚くなったため、劈開面より先に基板表面の欠陥からフッ酸水溶液が侵入したためと考えられる。またチューブの巻き上げが基板の(110)方向に向かっており、エッチングの異方向性が確認された。またどちらのサンプルでも発光特性にバンド変調効果による波長の長波長化が観測された。

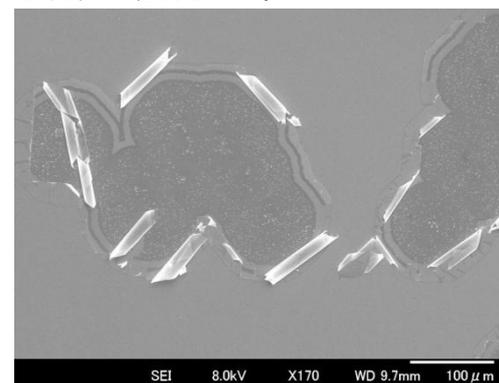


図3: 積層量子ドットを含むマイクロチューブの電子顕微鏡写真

4.2 発振モードの数値解析

FD-TDシミュレーションの結果、図4に示す光の電界がマイクロチューブ壁に平行な場合はモードが持続存在することが分かった。一方、光の電場が壁に垂直な場合は、光パワーが散逸するためモードが持続せずに

すぐ消滅してしまうことが分かった。

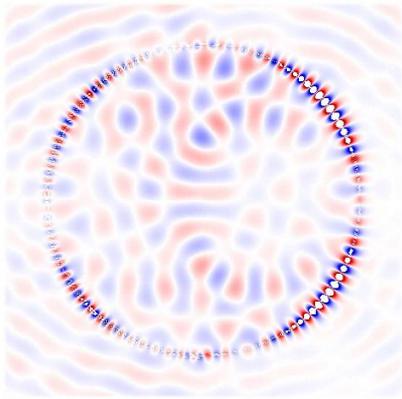


図 4: FD-TD シミュレーションによる発振モード解析例

また光の周回中に基板での光吸収がレーザ発振の妨げになること、発振に必要な基板との間隔も明らかとした。

4.3 基板から遊離するマイクロチューブの作製

4.2 で述べた知見から、基板とマイクロチューブの間隔を拡げるべく、橋構造のウェットエッチングを行った。これは図 5 に示すように、コの字型のメサをエッチングしておき、赤い矢印方向にチューブを巻くときにチューブの中央の下にあたる場所に溝ができるようにしておくことで実現できる。

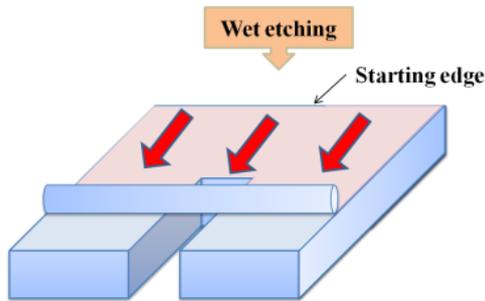


図 5: 橋構造マイクロチューブ

図 6 に作製した橋構造マイクロチューブの電子顕微鏡写真を示す。コの字型 (黄色い線) に作製したメサの左側からマイクロチューブ壁が巻き上がり、赤印で示した部分が基板から遊離されている。

基板から遊離した部分を選択的にレーザ光で励起してレーザ発振の実現を試みた。しかしながら、発光スペクトルは図 7 に示すものとなり、励起光強度を上げててもレーザ発振に特有なシャープな輝線とならなかった。このことから、レーザ発振は観測されず、そ

の理由は、基板との遊離距離が不十分であるか、あるいは励起光強度が不十分であるかのどちらかであると考えている。

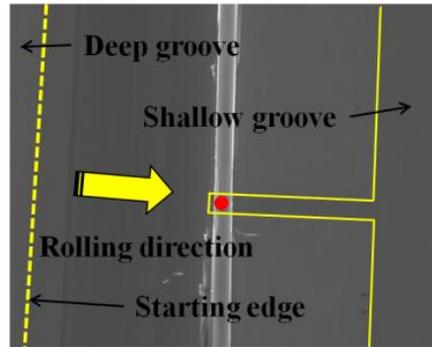


図 6: 橋構造マイクロチューブの電子顕微鏡写真。黄色い線がコの字型のパターンであり、赤印が基板から遊離したマイクロチューブの位置を示す。

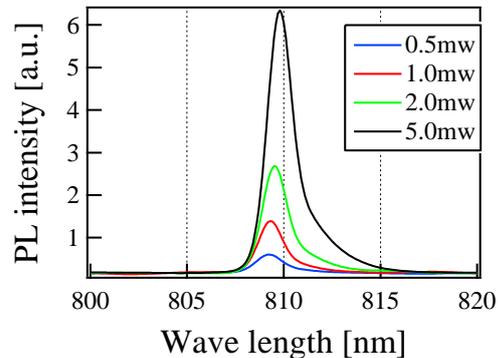


図 7: 橋構造マイクロチューブの発光スペクトルの励起光強度依存性

上記のように、この研究期間内では目標としていたレーザ発振は実現しなかった。理由のひとつは 23 年度の半ばから半導体結晶の製造装置が故障したために新しいサンプルが入手できなかったことが上げられる。今後も研究分担者、連携研究者とも共同研究を継続して研究成果を発信し続ける予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 大谷直毅: "超高密度量子ドット作製技術", 未来材料, Vol. 9, No. 7, pp. 26-31 (2009) 査読無。

[学会発表] (計 11 件)

- ① Y. Ito, K. Akahane, M. Hosoda, and N. Ohtani: "Fabrication and

- photoluminescence properties of semiconductor microtubes separated from substrates like bridge structures”, 5th International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA 2012), 奈良, 2012年6月6日。
- ② 伊藤祐輝, 西田博貴, 赤羽浩一, 細田誠, 大谷直毅: “基板から分離した半導体マイクロチューブの作製と光学特性”, 第8回薄膜材料デバイス研究会, 京都, 2011年11月5日。
- ③ 伊藤祐輝, 西田博貴, 赤羽浩一, 細田誠, 大谷直毅: “積層量子ドット構造を含む半導体マイクロチューブの作製と光学特性”, 2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会, 山形大学, 2011年9月2日。
- ④ 片山直輝, 細田誠: “量子井戸マイクロチューブレザ発振に対する吸収基板の影響”, 2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会, 山形大学, 2011年9月2日。
- ⑤ Y. Ito, H. Nishida, K. Akahane, M. Hosoda and N. Ohtani: “Fabrication and photoluminescence properties of semiconductor microtubes containing stacked quantum dots”, 15th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA-XV), 韓国済州島, 2011年7月6日。
- ⑥ 大谷直毅, 西田博貴, 吉川梨恵, 伊藤祐輝, 赤羽浩一, 細田誠: “半導体マイクロチューブの作製と光学特性”, 第48回同志社大学理工学研究所研究発表会, 京都, 2010年12月2日。
- ⑦ N. Ohtani, Y. Mizoguchi, R. Yoshikawa, H. Nishida, K. Akahane, and M. Hosoda: “Optical properties of semiconductor microtubes containing quantum wells and quantum dots”, 23rd General Conference of the Condensed Matter Division of the European Physical Society (CMD23), ポーランド、ワルシャワ、2010年8月30日。
- ⑧ 大谷直毅, 溝口裕一郎, 吉川梨恵, 西田博貴, 赤羽浩一, 細田誠: “量子ドットを含む半導体マイクロチューブの作製と光学特性”, 2010年春季第57回応用物理学会関係連合講演会, 東海大学, 2010年3月17日。
- ⑨ Y. Mizoguchi, H. Nishida, R. Yoshikawa, S. Saravanan, M. Hosoda, and N. Ohtani: “Influence of number of turns and uniformity of the internal strain distribution on the optical properties in semiconductor microtubes”, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN), 米国ハワイ、マウイ島, 2009年12月1日。
- ⑩ 細田誠, 溝口裕一郎, 大谷直毅: “量子井戸マイクロチューブとその発光特性”, 2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会, 富山大学, 2009年9月9日。
- ⑪ Y. Mizoguchi, S. Hiratsuka, S. Takeda, S. Saravanan, M. Hosoda, and N. Ohtani: “Influence of the number of turns and the distortion of the shape on the optical properties of semiconductor microtubes”, 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS14), 神戸, 2009年7月21日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 直毅 (OHTANI NAOKI)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 80359067

(2) 研究分担者

細田 誠 (HOSODA MAKOTO)
大阪市立大学・工学研究科・教授
研究者番号: 80326248

(3) 連携研究者

赤羽 浩一 (AKAHANE KOUICHI)
独立行政法人情報通信研究機構・第一研究部門・主任研究員
研究者番号: 50359072