

Title	円形欠陥フォトニック結晶レーザに関する理論的及び 実験的研究
Author(s)	熊, 一帆
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/82237
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

円形欠陥フォトニック結晶レーザに関する 理論的及び実験的研究

熊 一帆

2021年1月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第1章	序諸	2 Ħ	. 1
1.1	緒言		1
1.2	フォ	トニック結晶	2
1.2	2.1	2次元フォトニック結晶のフォトニックバンド構造	3
1.2	2.2	欠陥を持つフォトニック結晶	6
1.3	2 次	元フォトニック結晶レーザ	7
1.3	3.1	バンド端2次元フォトニック結晶レーザ	8
1.3	3.2	欠陥共振器型フォトニック結晶レーザ	9
1.4	研究	目的と内容	10
第2章	円形	≶欠陥フォトニック結晶レーザアレイ	13
2.1	緒言		13
2.2	円形	欠陥フォトニック結晶レーザ	14
2.2	2.1	円形欠陥共振器	15
2.2	2.2	レーザのヘテロ層構成	17
2.2	2.3	共振器と導波路の結合	18
2.3	レー	ザアレイ	19
2.3	3.1	アレイ構成	20
2.3	3.2	フォトダイオードアレイとの組み合わせ	21
2.3	3.3	電子回路への実装	23
第3章	円形	彡欠陥フォトニック結晶レーザの解析	25
3.1	緒言	·	25
3.2	レー	ト方程式による解析	26
3.2	2.1	理論モデルの構築	26
3.2	2.2	閾値電流	29
3.2	2.3	緩和振動周波数	30

3.	.3	時間]領域差分法による光特性の解析	33
	3.3	.1	時間領域差分法	33
	3.3	.2	円形欠陥共振器の理論特性	35
	3.3	.3	共振器と導波路の結合	49
第4章	卸	要素	专技術	52
4.	.1	緒言		52
4.	.2	電子	-線リソグラフィー	52
	4.2	.1	装置仕様	53
	4.2	.2	高精度描画について	55
4.	.3	ドラ	イエッチング	57
	4.3	.1	エッチングメカニズム	57
	4.3	.2	エッチングガス組成	59
	4.3	.3	他の制御パラメータ	60
第5章	卸	円刑	彡欠陥フォトニック結晶レーザの光学特性評価	62
5.	.1	緒言		62
5.	.2	測定	至系	63
5.	.3	Air/	AlO _x クラッド層レーザの光特性	66
	5.3	.1	作製手順	66
	5.3	.2	共振器特性	69
	5.3	.3	断面の2次元光分布測定	73
5	.4	二層	AlOxクラッド層レーザの光特性	77
	5.4	.1	作製手順	77
	5.4	.2	共振器特性	78
第6章	氃	GaA	As/AlO _x の選択ドライエッチングによる円形欠陥共振器アレイ	こお
		ける	5.電流分離溝の作製	82
6.	.1	緒言		82
6.	.2	平坦	目な GaAs/AlO _x ヘテロ層のエッチング	84
	6.2	.1	実験手順	84
	6.2	.2	結果及び考察	87

6.	.3 フォ	トニック結晶構造を有する GaAs/AlOx ヘテロ層へのエッチング	90		
	6.3.1	実験手順	90		
	6.3.2	結果及び考察	91		
6.	.4 電流	記分離溝の電流分離効果	95		
	6.4.1	作製手順	96		
	6.4.2	電気抵抗測定方法	99		
	6.4.3	結果及び考察	100		
第7章	筆 結諸	ъ. П	105		
参考文献107					
謝辞117					
業績間	業績目録118				

第1章 序論

1.1 緒言

プロセッサの処理能力は Moore 法則が予測したように急速に増強してきている。し かし、電気配線伝送方式の発熱、遅延によって、限界が懸念される[1,2]。高帯域幅、低 損失及び低干渉などの特徴を持つ光伝送は、このボトルネックを解消する有望な候補の 一つである[3,4]。光伝送の応用は長距離の広域ネットワーク(数km~数百km)から、短 距離のラック間(10-300 m)、ボード間(<10 m)、チップ間(<50 cm)、チップ内(<1 cm)へ発展している。伝送距離の短縮に伴って、光モジュールに求める伝送容量密度が 急速に増加している。その値は最初のLAN-WANに対する1Gbps/cm²からボード間の 1Tbps/cm²となり、さらにチップ間の10Tbps/cm²までに増加している[5]。光伝送の最 終の目標はチップ内コア間である。CMOS集積化技術の発展に伴って、コアのクロック 周波数及びコア数が増加しつつあり、将来のアーキテクチャでは1Tbpsの帯域幅が必 要となる。光モジュールが占める面積を1×10⁴ cm²に規定すると、チップ内光伝送を 実現するには10Pbps/cm²が必要と推測される[6]。

半導体レーザは光伝送システムにおいてキーデバイスである。短距離の光伝送におい て、レーザの低消費電力化、小型化、及び高速化は重要な設計方針である。従来の分布 帰還型レーザ[7-9]、または分布反射型レーザ[10]などの端面発光レーザは面内方向の光 集積回路を構築するには有利であるが、長さ~100 µm、幅~1µm のあるデバイスの消費 電力がチップ内の光伝送にとっては巨大である。垂直共振器面発光レーザ (Vertical Cavity Surface Emitting Laser: VCSEL) は、低閾値及び高速直接変調で動作可能であり、 データセンターやスーパーコンピュータではラック間とボード間の光伝送の直接変調 光源として広く使用されている[11-13]。しかし、VCSEL は、面内方向の光集積回路に 集積される際に、45°の全反射ミラー[14-16]、または回折格子[17]が必要となる。マイク ロディスクレーザ[18-24]とリングレーザ[25]は光帰還用のへき開面または回折格子を 必要としないため、作製が容易ではあるが、円形共振器のサイズが回折限界まで縮小す ると、曲げ損失が急速に増加し、レーザの性能が劇的に劣化する。以上のように、短距 離の光伝送に向けて様々なレーザ構造が提案されてきたが、10 Pbps/cm² という伝送容 量密度の要求を満たす適切なレーザ光源が未だに存在してない。そこで、フォトニック 結晶構造を利用したレーザは超小型、高 *Q* 値などの特徴を持ち、非常に有望な光源と して注目を集めている[26-29]。

1.2 フォトニック結晶

フォトニック結晶は、1987 年に E. Yablonovitch により提案され[30]、屈折率が異なる 材料を光波長程度の周期で配列した構造体である。特定の屈折率周期性を持つフォトニ ック結晶では、固体結晶における電子バンドギャップと類似するフォトニックバンドギ ャップ (Photonic Band Gap: PBG) が形成される。PBG に該当する波長帯域の光がフォ トニック結晶に入射した場合、PBG 効果により伝搬できず、材料による吸収以外は反射 される。そして、周期構造から乱れた欠陥をフォトニック結晶内に意図的に導入すると、 PBG 効果によりその欠陥部に光が強く閉じ込められ、低損失の微小共振器を作製でき る[31]。最初のフォトニック結晶の概念は3次元周期性を持ち、完全な PBG を形成でき る構造体となっているが[32-35]、作製困難や高コストなどの理由からその概念が 2 次 元また1次元に拡張された。従来の分布帰還型レーザ、分布反射型レーザ、又はVCSEL は1次元 PBG 効果を利用することから、1次元フォトニック結晶レーザとも言える。 これらのレーザでは1方向のみ光の伝搬を制限し、それ以外の方向に伝搬する光が殆ど レーザ発振に寄与せず、消滅するため、光の利用効率が低い。2次元または3次元フォ トニック結晶の PBG 効果を利用すれば、サイズ、消費電力、帯域幅などの点で従来の 半導体レーザを著しく上回る革新的な半導体レーザを実現できると期待される。2次元 周期性を持つフォトニック結晶は現有の半導体加工技術と整合性が良く、3次元フォト ニック結晶と比較して容易に作製できるため、光伝送を初め[36-40]、生体センサー[4146]、レーザ加工[47,48]など様々の分野で注目を集めている。2次元フォトニック結晶は、 主に薄板のようなスラブ構造であり、面内方向では2次元 PBG 効果を、上下方向では スラブとクラッド材料の境界における全反射を利用して、強い光閉じ込めを実現してい る。

1.2.1 2次元フォトニック結晶のフォトニックバンド構造

2 次元フォトニック結晶を構成する周期構造としては、三角格子、正方格子、グラフ アイト形六方格子などが挙げられ、中でも三角格子は6本の対称軸を持ち、π/3の回転 で不変のため、最も高い対称性を持つ。図 1.1 (a) は誘電体スラブ基板上に空孔を三角 格子状に配置して構成された2次元フォトニック結晶を示している。三角格子を構成す る *x-y* 平面内の基本ベクトル a, と a, は格子定数 a を用いて、

$$\mathbf{a}_1 = (1,0,0)a \tag{1.1}$$

$$\mathbf{a}_2 = (\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}, 0)a \tag{1.2}$$

で与えられ、 $|\mathbf{a}_1| = |\mathbf{a}_2| = a$ である。そして、波数 \mathbf{k} 空間における逆格子の基本ベクトル $\mathbf{G}_1 \succeq \mathbf{G}_2$ は

$$\mathbf{G}_{1} = (1, \frac{-1}{\sqrt{3}}, 0)\frac{2\pi}{a} \tag{1.3}$$

$$\mathbf{G}_2 = (0, \frac{2}{\sqrt{3}}, 0) \frac{2\pi}{a} \tag{1.4}$$

と表される。三角格子の第一 Brillouin 領域は図 1.1 (b) に示すような六角形になる。こ こで、第一 Brillouin 領域は原点と逆格子点が逆格子ベクトルの垂直 2 等分線で囲まれ た領域として定義されている。三角格子の対称性から、計算すべき波数 k 空間は Γ、M、 K が頂点となる三角形に集約でき、これを周期的に拡張することで任意の逆格子空間に おけるフォトニックバードをえることができる。F、M、Kの座標 (k_x, k_y, k_z) はそれぞ れ (0,0,0) $\frac{2\pi}{a}$ 、 ($\frac{1}{2}, \frac{1}{2\sqrt{3}}, 0$) $\frac{2\pi}{a}$ 、 ($\frac{2}{3}, 0, 0$) $\frac{2\pi}{a}$ である。



図 1.1: (a) 2 次元スラブ型三角格子フォトニック結晶構造、(b) それに対応する第一 Brillouin 領域、(c) それに対応するバンド構造 ($\epsilon_1 = 11.56$ 、 $\epsilon_2 = 1$ 、a = 360 nm、r = 0.3 a、 h = 220 nm)

無限大の 2 次元系では、電磁界は 2 つの横方向偏光モード、つまり、TE モード (電 界 E(r)が xy 平面に平行) と TM モード (磁界 E(r)が z 軸に平行) に分離できる。TE モ ードと TM モードは直交関係 ($E_{TE} \cdot E_{TM} = 0$) となっており、相互作用せずに存在でき る。しかし、スラブ構造になると並進対称性がないため、電磁界を TE、TM モードに分 類できなくなる。そこで、スラブを 2 等分する平面に対して、電磁界分布は全対称 (even) か、または反対称 (odd) であるかによって、電磁界を even モードと odd モードに分類 することができる。電磁界に関する even モードと odd モードの定義を表 1.1 に示す[49]。

図 1.1 (c) には、2 次元スラブ型三角格子フォトニック結晶のバンド構造を示している。ここで、誘電体の比誘電率を $\varepsilon_1 = 11.56$ (GaAs) とし、空孔及びスラブを挟むクラッド層の比誘電率を $\varepsilon_2 = 1$ としている。スラブ厚み h、格子定数 a、空孔半径 r をそれぞれ 220 nm、360 nm、0.3 a としている。PBG 効果がスラブ面内を伝搬する光のみに働くので、スラブ外へ伝搬する光は放射モードと結合し漏れ出していく。スラブ外へ漏れる光は

$$\omega \ge \frac{c}{n_{\text{clad}}} |\mathbf{k}| \tag{1.5}$$

で決められ[50]、図 1.1 (c) の灰色となっている光円錐 (Light cone) に対応している。ここで、*n*_{clad}はクラッド層の屈折率である。図 1.1 (c) から、光円錐以外の部分では、even モードに対してのみ*ωa* / 2*πc* = 0.258 ~ 0.334 の範囲に PBG が存在することがわかる。この PBG 範囲は真空中の波長に変換すると、1077.8 ~ 1395.3 nm となる

表 1.1: 電磁界の各成分に関する even、odd モードの定義

	E_x	E_y	E_z	H_x	H_y	H_z
even modes	even	even	odd	odd	odd	even
odd modes	odd	odd	even	even	even	odd

1.2.2 欠陥を持つフォトニック結晶

フォトニック結晶の周期構造から乱れた部分、すなわち欠陥があると、固体結晶で電 子の欠陥準位が形成されると同様に、元々PBGの範囲に欠陥モードが現れる。欠陥周り の結晶では完全な周期性を持ち、PBGが存在するため、欠陥モードに対応する光は欠陥 に強く閉じ込められる。この欠陥モードの性質は欠陥の形に大きく依存し、点欠陥だと、 局在モードとなるが、1列または数列の空孔を除いた線欠陥だと、導波モードとなる。

例として、図 1.2 (a) のように 2 次元スラブ型三角格子フォトニック結晶の Γ-K 方向 に空孔を一列除くことでフォトニック結晶線形導波路 (W1 導波路) が形成される。本 研究では、光導波路として、この W1 導波路を用いた。W1 導波路における導波モード はスーパーセル法により計算できる。図 1.2 (a) に点線で囲まれた (1*a* × 8*a*) 領域が スーパーセル法計算に用いた単位格子を表す。図 1.2 (b) は even モードに対するバンド 計算の結果を示している。明るい灰色領域は光円錐、暗い灰色領域は欠陥がない元々の スラブ構造にモードが存在する領域を表す。図 1.2 (b) から分かるように、線形欠陥を 形成することによって、元々PBG の範囲にモード A とモード B の 2 つのモードが現れ た。モード A とモード B の磁界分布を図 1.2 (c) に示す。 この 2 つのモードに対応す る光を W1 導波路に入射すると、その光は面内の PBG 効果と z 方向の全反射によって 線欠陥に強く閉じ込められ、結果として線欠陥に沿って伝搬することになる。



図 1.2: (a) 直線欠陥を持つ 2 次元スラブ型三角格子フォトニック結晶構造、 (b) それに対応する even モードのバンド構造 (明るい灰色領域:光円錐、暗い灰色領域:スラブモード領域)、(c) モード A とモード B の磁界分布図 (白丸:空孔位置)

1.3 2次元フォトニック結晶レーザ

フォトニック結晶半導体レーザは発振のメカニズムによって、大きく二つの種類に分

類できる。一つはフォトニック結晶のバンド端で生じた定在波を励起させるものである。 もう一つは、フォトニック結晶に共振器としての欠陥を導入し、PBGの光閉じ込め効果 により欠陥モードを励起させるものである。

1.3.1 バンド端2次元フォトニック結晶レーザ

2次元フォトニック結晶のバンド端では、多方向に分散されたフィードバック効果に よりバンド端共振が発生する。例えば、六回対称性を持つ2次元三角格子フォトニック 結晶の場合、Γ-K方向に入射した光が反対の180°の方向に回折される以外に、ブラッグ の回折条件を満たす±60°、±120°方向にも同時に回折される[51]。その結果、各Γ-K方 向に伝搬する光は、2次元回折によって互いに結合され、定在波になる。そして、この 定在波に光学ゲインを与えるとレーザ発振が発生する。バンド端共振効果はフォトニッ ク結晶の対称性に由来するため、理論的に、フォトニック結晶の周期が一致すればフォ トニック結晶が占めるすべての領域にわたってコヒーレントなレーザ発振が得られる。 よって、大面積高出力レーザを作製するには有利である。さらに、フォトニック結晶の 空孔形状や格子点の位相などを調整することで、出力ビームの形状や偏光モードなども 制御できる[52]。

バンド端共振効果を利用した2次元フォトニック結晶レーザとして、京都大学の野田 グループが開発したフォトニック結晶面発光レーザ (Photonic Crystal Surface Emitting Laser: PCSEL) が代表的である[47]。PCSEL は従来の VCSEL の垂直構造に基づいて活 性層の片側に2次元フォトニック結晶層を挿入し、バンド端共振効果を利用する。 PCSEL はビーム品質、出力と放射角などの点において従来の VCSEL よりも優れている ため、商品化までに至った。ただし、面積と消費電力が比較的に大きいため、PCSEL は 低消費電力と高伝送容量密度を求めるチップ内光伝送に適していない。

8

1.3.2 欠陥共振器型フォトニック結晶レーザ

欠陥共振器を持つ 2 次元フォトニック結晶レーザは、PBG 効果により、共振器の寸 法を μm また nm スケールに縮小できるので、小型、高帯域幅且つ低消費電力の半導体 レーザを実現するには有利である。また、位相がランダムな自然放出光も PBG 効果に より抑制されるため[53]、レーザの効率は大幅に向上すると期待される。以下で欠陥共 振器フォトニック結晶レーザの典型的な例について述べる。

1999年に、Painter らは空気をクラッド層とする 2 次元三角格子フォトニック結晶構 造に点欠陥を導入した光共振器を使用し、143K の低温とパルス光励起の条件でレーザ の発振に成功した[54]。これにより、極小欠陥共振器を用いたフォトニック結晶レーザ の可能性は実証された。

実用のために、電流注入型のレーザが必要である。初期の電流注入型フォトニック結 晶レーザとして、2004年の Park らの報告は代表的である[55]。彼らは、共振器の下にマ イクロ電流ポストを使用し、電流注入により単一欠陥モードの発振を実証した。ただし、 マイクロ電流ポストは共振器の中心に分布する光を吸収するため、共振器の Q 値を大 幅に低下させる。さらに、マイクロ電流ポストの横断面積が小さいため、熱抵抗が高い。 これらのことから、このレーザはパルス条件でしか動作できなかった。

NTT の松尾らは、埋め込み技術に利用して、W1 導波路に活性層を入れることで、室 温 (room temperature: RT) 条件でフォトニック結晶レーザの連続発振 (continuous wave: CW) に成功した[36]。このレーザは LEAP (Lambda-scale Embedded Active-region Photonic crystal) レーザと呼ばれ、2013 年に達成した閾値電流と消費電力がそれぞれ 4.8 μ A と 4.4 fj/bit であり、世界記録を更新し、光伝送分野に大きなインパクトを与えた[37]。 さ らに、LEAP レーザは直接ボンディングによりシリコン基板上で、閾値電流 40.5 μ A、 最大出力パワー4 μ W の発振動作も実証された[40]。しかし、LEAP レーザは未だに商品 化されてない。その理由として、幾つか挙げられる。先ずは、レーザの微分抵抗が約 5 kΩと大きく、レーザの性能が高抵抗に起因する発熱によって制限される。また、LEAP レーザでは活性層を幅数百 nm の W1 導波路に埋め込むため、nm レベルの位置合わせ 精度が必須であり、作製が困難である。

CrosnierらはInPナノリブで作られた1次元フォトニック結晶レーザを報告した[56]。 特定のナノリブ設計により、その光学特性を損なうことなく、共振器内へ効率的なキャ リアの注入が可能になる。 このレーザは、厚さ450 nm、幅 600 nm、長さ15 μm の InP ベースのリブ導波路に半径 90 nm の空孔を1列に作製することで構成されている。 空 孔間距離は、構造中心の 300 nm から 330 nm に徐々に増加する。このような構成によっ て、RT-CW 単一モード動作で比較的大きな出力パワー80 μW が得られた。しかし、100 μA の高い閾値と大きなフットプリントは弱点である。

1.4 研究目的と内容

前述のように、いくつかの研究グループがさまざまな2次元フォトニック結晶レーザ の構造を提案し、発振動作を実証してきたが、10 Pbps/cm²という伝送容量密度の要求を 満たす電流注入型フォトニック結晶レーザはまだ存在してないのが現状である。このよ うな状況を打開するために、我々は新たな電流注入型フォトニック結晶レーザを提案し [57]、その開発に取り組んでいる。この革新的なレーザはフォトニック結晶構造に円形 欠陥 (Circular defect)を導入することで共振器を構成しており、本論文では、CirD レー ザと呼ぶ。円形欠陥共振器の半径を変えることにより、高い Q 値を維持したままで、共 振波長を制御できる[58]。そこで、複数の半径の異なる円形欠陥共振器を共通の導波路 の近傍に設置すれば、チップ内の波長多重通信 (Wavelength division multiplexing: WDM) が期待できる。そこで、本論文では、チップ内 WDM 実現にむけて、CirD レーザの有望 性を理論と実験の両方から検討することを研究目的としている。以下で論文の構成につ いて述べる。 第2章では、先ずCirDレーザ構造の特徴について述べる。CirDレーザでは、円形欠 陥共振器と AlGaAs/AlO_xクラッド層を利用することが特徴である。これらの特徴がもた らす利点について述べる。また、CirD レーザに基づいて、チップ内 WDM を図るレー ザアレイ構造を提案し、その実用性について考察する。

第3章では、レート方程式と時間領域差分法 (Finite-difference time-domain method: FDTD 法)を用いて、CirD レーザの理論特性を解析し、CirD レーザアレイの理論可能性を検討する。具体的に、レート方程式を用いて、レーザの閾値と変調特性を調べ、実際の電流注入におけるレーザの特性を検討する。また、FDTD 法を用いて、円形欠陥共振器の各パラメータが共振波長と Q 値に与える影響を定性的・定量的に解析する。そして、円形欠陥共振器と導波路の結合について述べる。

第4章では、CirD レーザの作製に必要な電子線 (Electron beam: EB) リソグラフィー とドライエッチング技術について述べる。また、高精度の EB リソグラフィーを実現す る方法について述べる。

第5章では、電流注入型 CirD レーザを実現する前段階として、2種類のクラッド層 構造の円形欠陥共振器を作製し、その発光特性を光励起法によって評価する。具体的に、 上クラッド層と下クラッド層がそれぞれ空気と AlO_x で構成される構造と上下クラッド 層とも AlO_x で構成される構造を用いる。1つ目の構造は、空気クラッド層を用いるた め、エッチングが容易となり、高い垂直性の空孔が得られる。2つ目の構造は、共振器 中心部分の AlGaAs が AlO_x に酸化されている以外は電流注入型構造と同様である。こ の二種類の構造を持つ円形欠陥共振器の光特性について、閾値、スペクトル、波長制御 性などの面から評価し、その結果について記述する。

第6章では、CirD レーザアレイにおける隣接共振器間の電流分離溝 (Current Blocking Trench: CBT)を実現する GaAs/AlO_xの選択ドライエッチング技術について述べる。具体 的には Cl₂/BCl₃/CH₄の混合ガスを利用したドライエッチングによる GaAs/AlO_x 選択エッ

チングを紹介する。フォトニック結晶構造を形成する空孔の存在がエッチングに影響すると考えられるため、選択エッチングは、フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_xへテロ層とフォトニック結晶構造のない平坦な GaAs/AlO_x ヘテロ層で行われる。また、円形欠陥共振器アレイ上に CBT を作製し、隣接する共振器間の電気抵抗を測定し、CBT の電気絶縁効果について述べる。

第7章では、本研究で得られた成果を総括し、本論文における結論を述べる。

第2章 円形欠陥フォトニック結晶レー ザアレイ

2.1 緒言

20世紀70年代における半導体レーザの室温連続発振成功と低損失光ファイバーの実 現は、光伝送による通信システムの商用化を可能にした。過去半世紀で、光伝送技術は 飛躍的な進歩を遂げ、帯域幅に対する需要の高まりにより、ネットワークとリンクの長 さが10m(ボード間)を越える領域で電子データ伝送との置き換えが行われた。近年で は、最先端の電子集積回路の製造技術と互換性を持つシリコンフォトニクス技術により、 光集積回路の微細化が急速に発展し、それを背景に、光伝送の応用検討はチップレベル に入ってきた[59-62]。2014年に、20 Gbpsのデータリンクと30 Tbps/cm²の伝送容量密 度が実証されたことから[63]、チップ間光伝送はまもなく商用化の段階に踏み出すこと が予想でき、次の領域としてのチップ内光伝送を視野に入れなければならない。そのた め、10 Pbps/cm²の伝送容量密度が必要と推測される[6]。

究極のチップ内光伝送は、シリコンフォトニクスベースの光集積回路と電子回路を高 度融合したシステムになる。これまで、シリコンを用いて、光導波路をはじめ[64-66]、 変調器[67,68]、光検知器[69,70]、分・合波器[71]など光回路に必要なデバイスがほぼ全 部実証されてきた。しかし、シリコンは間接バンドギャップのため、シリコンを用いて 高効率の電流注入型レーザを作ることはまだ課題のままである[72-74]。従って、シリコ ンフォトニクスと III/V 族材料ベースの光源の組み合わせが現在最も実現可能な選択肢 である。チップレベル光リンクの実装方式は、主に2つに分けられる。最初の最も簡単 な方式は、ファイバーを介して外部レーザ光源をシリコンチップに結合することである [75-77]。この手法は、交換簡易さと温度安定性に特徴を持つが、追加の結合損失により エネルギー効率が低く、必要なフットプリントも大きいため、伝送容量密度の問題に対 する長期的な解決策にはならない。二つ目は、ヘテロエピタキシー結晶成長、またはボ ンディング技術などにより、レーザを直接チップ上に設置する手法である。この手法は、 コンパクトな回路を構築する上で有利であるため、回路の消費電力、コスト、及び寄生 容量の削減が期待できる。本章では、2 つ目の手法に向けた電流注入型 CirD レーザ光 源について説明してから、超コンパクトの送受信器の構成について検討する。

2.2 円形欠陥フォトニック結晶レーザ

欠陥共振器型フォトニック結晶レーザは、理想的なレーザとして大きな注目が集めて きたが、提唱から 30 年以上経った現在も、光通信分野に殆ど貢献していない。これは、 電流注入型デバイスの欠如によるものである。欠陥共振器型フォトニック結晶レーザで は、上下方向への放射損失を最小限に抑えるために、通常、クラッド層には低屈折率の 空気が使用される。しかし、空気クラッド層を用いる場合、共振器にキャリアを注入す ることが困難であるため、初期段階で報告された欠陥共振器型フォトニック結晶レーザ は殆ど光励起方式のものだった[27,54,78]。

共振器にキャリアを注入するため、p-i-n 接合を構成する必要がある。LEAP レーザは、 空気クラッド層を利用しているが、イオン注入などの技術により水平方向の p-i-n 接合 を形成することで、横方向からのキャリア注入に成功した[37]。しかし、この方式では 電気抵抗の低減という重大な課題に直面している。また、大部分のキャリアは、空孔を 通過する際に空孔の表面でトラップされ、非放射再結合によって消費される。従って、 この方式では高い内部量子効率を得るのが困難である。一方、空気クラッド層を使用せ ず、コア層の上下方向に p型とn型クラッド層をつけることでキャリア注入を実現する 方法もある。しかし、この方法には、誘電体クラッド層の存在により、上下方向への光 放射損失が大きいという問題点が存在する[55,79-81]。従って、強い光閉じ込めと効率 的なキャリア注入が同時に得られるデバイス構造の設計は、欠陥共振器型フォトニック 結晶レーザが実用化されるための鍵となる。図 2.1 に示す電流注入型 CirD レーザはこの問題を解決できると期待される。CirD レーザ構造の特徴は円形欠陥共振器と AlGaAs/AlOx クラッド層の組み合わせである。以下でこの 2 つ特徴について説明する。



図 2.1: 電流注入型 CirD レーザの概略図[6]

2.2.1 円形欠陥共振器

円形欠陥共振器は、マイクロディスクレーザの円形共振器と類似している[20,82]。マ イクロディスクレーザの円形共振器では、whispering gallery mode (WGM) と呼ばれるモ ードが形成される。WGM のエネルギーは主に共振器外周に存在するため、共振器の中 心部に高屈折率のクラッド層が存在しても、Q 値に殆ど影響しない。従って、マイクロ ディスクレーザでは、共振器の中心部に垂直方向 p-i-n 接合を設置することで、効率的 な発振が得られる。しかし、マイクロディスクレーザでは、全反射によって光を閉じ込 めているので、円形共振器の直径が回折限界まで縮小すると、曲げ損失が急速に増加し、 レーザの性能が劇的に劣化する。また、シンプルな円形共振器が作製容易ではあるが、 サイズが比較的大きいため、利得範囲に複数のモードが存在し、単一モードを得るのも 困難である[22,23]。これを克服するために、円形共振器のエッジに WGM の半波長に等 しい周期の回折格子をつけて、"ギヤ状"にすることでサイドモードを削減する取り組 みも行われている[83]。

一方、フォトニック結晶レーザでは、PBG 効果によって、上記の回折限界による性能 低下を克服することができる。そこで、同じ WGM を形成する円形欠陥共振器を採用 し、共振器の中心部分で垂直方向の p-i-n 接合を構築すれば、強い光閉じ込めと効率的 なキャリア注入が同時に得られると期待できる。ここで、円形欠陥共振器の構成につい て説明する。図 2.2 (a) は2次元三角格子フォトニック結晶に1個の空孔だけを取り除 いて構成された共振器を示している。この共振器は通常 H1 共振器と呼ばれている [84.85]。類似して、H1 共振器の外周の空孔をさらに1列または2列を取り除いて構成 された共振器はそれぞれ H2 または H3 共振器と呼び、それぞれの様子を図 2.2 (b) と 図 2.2(c) に示している。そして、図 2.2(d) に示すように、H3 共振器外周の空孔を円 対称に配置すれば、円形欠陥共振器が構成される。共振器外周の空孔を円対称にするこ とによって、上下方向への放射損失が抑制され、Q値が大幅に増大する[58]。これは、 共振器外周の空孔を円対称にすることにより、構造の対称性が良くなり、遠距離場での キャンセル効果が強くなることによると考えられる[86]。本研究では、円形欠陥共振器 の半径 R は、共振器中心から隣接空孔の中心までの距離として定義する。単純な円形共 振器では、波長の整数倍が共振器の円周長に一致すれば定在波が生成できるので、複数 の WGM が形成される。一方、円形欠陥共振器は、隣接空孔の存在により、単純な円形 共振器と異なり、単一な WGM が形成される。H2 及び H4 共振器は、H3 共振器と同様 に共振器外周の空孔を円形にすれば、同じ円形欠陥共振器を構成できる。 ただし、H3 共 振器と比べて、H2 共振器の面積が小さいため、垂直方向 p-i-n 接合が構成された際に、 電気抵抗が高くなり、RT-CW 動作が実現困難と考えられる。一方、H4 共振器またそれ より大きなサイズを使用すると Q 値が低下し、レーザ発振の要件を満さない可能性も ある[58]。従って、H3 共振器は、CirD レーザを作製するための最良の選択肢である。

16



図 2.2: 共振器の概略図 (a) H1 共振器、(b) H2 共振器、(c) H3 共振器、(d) 円形欠陥共振器

2.2.2 レーザのヘテロ層構成

CirD レーザは、垂直方向の p-i-n 接合を形成するために、多層のヘテロ構造によって 構成されている。その層構成は、最上層から順に、p-GaAs コンタクト層、p-AlGaAs/AlOx クラッド層、GaAs コア層、n-AlGaAs/AlOx クラッド層、n-GaAs 基板となっている。 GaAs コア層の中に、利得媒質が含まれている。利得媒質には、InAs 量子ドットと GaInNAs 量子井戸が使用できる。GaInNAs 量子井戸は高いモードゲインを提供するが、 フォトニック結晶加工を行うと空孔の側壁における非放射再結合率が大きい。一方、 InAs 量子ドットは非放射再結合率、温度依存性、及び透明キャリア密度の面において量 子井戸より優れている。そこで、本研究では、InAs 量子ドットを用いた。

AlGaAs/AlO_xクラッド層は、空孔を通して AlGaAs を選択的に酸化することで作製で きる。共振器中心部分の AlGaAs は、図 2.1 に示すように、未酸化のまま保持されて、 キャリアが流れる AlGaAs ファネルとなる。このヘテロ構造は酸化物電流狭窄型 VCSEL に類似している[87]。CirD レーザでは、PBG 効果と WGM の特徴により、上下の DBR ミラーがなくても、十分な Q 値が期待できる。AlGaAs/AlO_xクラッド層の導入により、 少なくとも 3 つの有利な特徴が生まれる。

- 1. AlO_xの絶縁性により、AlGaAsファネルは効果的な電流集中構造となる。
- 2. AlGaAs / AlO_xクラッド層はヒートシンクとしても機能するため[88]、熱的に安定 した動作が期待できる。この特徴は室温連続動作の実現をもたらす。
- 3. 共振器中心部分に強いエネルギーが存在する WGM 以外のモードが AlGaAs ファ ネルの存在により抑制されるので、単一モード動作が容易に実現される。

これらの重要な特性は、すべて AlGaAs ファネルが WGM の *Q* 値を大幅に低下させない場合にのみ有効である。第3章では、CirD レーザの理論特性についての解析を行う。

2.2.3 共振器と導波路の結合

欠陥型フォトニック結晶共振器内に生成されたレーザ光は、導波路と結合させること で取り出すことができる[37]。本論文では、図 2.1 に示すように、円形欠陥共振器内の 光を出力させるのに、W1 導波路を用いている。1.2.2 節で述べたように、W1 導波路で は、モードAとモードBの2つの導波モードが存在する。モードAの周波数がWGM の周波数と接近するため、CirDレーザでは、主にモードAが用いられる[89]。W1 導波 路の導波路幅を調整することにより、モードAの周波数を制御し、WGMの周波数と一 致させたとき、WGM とモードA との強い結合が発生する[89]。図 2.3 に、WGM とモ ードA と結合する様子を示している。導波モードの制御については、第3章で詳しく 述べる。



図 2.3: CirD レーザにおける WGM とモード A を結合する際の磁界分布図 (白丸: 空孔位置)[6]

2.3 レーザアレイ

今後も CMOS スケーリングが進むにつれて、より多くの CPU コアがマイクロプロセ ッサチップに統合され、チップ上のコア間の相互接続のために、光伝送回路は 10 Pbps/cm²という超高伝送容量密度を提供する必要がある。同じ導波路を介して複数の波 長を伝送する WDM 技術は、単一チャンネルの通信容量を拡大するために、不可欠であ る。チップ上に実装できる光チャンネルの数には制限があるので、将来のシステムは通 常、伝送容量密度の要求を満たすために WDM に基づいて設計される[90]。光合波器な どを利用した従来の WDM 技術は大きな設置面積を必要とするため[91]、チップ内光伝 送に対応する場合は、新たな手法が必要となる。

2.3.1 アレイ構成

CirD レーザの共振器の半径 *R* を変えるだけで発振波長を調整できるので、前述の問題に対処するための有望な解決策を提供できる。そこで、図 2.4 に示す CirD レーザアレイを提案する。1 つの W1 導波路の両側に、発振波長の異なる 20 個の円形欠陥共振器が配置されている。格子定数 *a* の値は約 360 nm である。各共振器が 10 周期以上の格子に囲まれていれば、水平方向には十分な光閉じ込めが得られので[88]、ここでは、2 つの隣接する共振器間の距離を 5 µm に設定している。従って、この直列の構成では、すべての共振器が共通の導波路を共有できるので、合波器なしで WDM 機能を活用でき、伝送容量密度を上げることが期待される。



図 2.4: WDM を実現する CirD レーザアレイの概略図[6]

CirD レーザ上部の GaAs コンタクト層が導電性であるため、垂直方向に注入された電流は、GaAs コンタクト層を通して隣接する共振器に拡散するという問題がある。WDM

応用のために、それぞれの共振器を独立に制御し、共振器同士を絶縁させる技術が不可 欠となる。AlO_xの絶縁性を考慮すると、隣接する共振器の間に GaAs コンタクト層をエ ッチングした電流分離溝 (current blocking trench: CBT) を作ることによりこの問題の解 決が期待できる。ただし、電流分離溝を作製する際に、下の AlO_x 層を損傷すれば、光 散乱が発生し、大きな光学損失になる恐れがあるので、GaAs/AlO_xに対して高い選択性 のあるエッチングを行う必要がある。この選択エッチング技術について、第6章で詳し く説明する。選択エッチング工程の後、蒸着とアニール工程によって各共振器の電極が 作製される。この時の CirD レーザアレイの様子は図 2.5 に示すようになっている。こ こでは、レーザを実装する際に、共振器にダメージを与えないように、共振器の外側の 5 μm×5 μm の領域がボンディングパッド (Soldering area) として設計している。



図 2.5: 電流分離溝と電極を作製後の CirD レーザアレイの概略図[6]

2.3.2 フォトダイオードアレイとの組み合わせ

シリコンフォトニックスを利用することで、シリコン光導波路を容易に作製できる。シリコンとその酸化物の間の高屈折率コントラストにより、シリコン導波路がサブミク

ロンに縮小でき、コンパクトな光集積回路の実現が期待できる。シリコンの基礎吸収端 が 1.1 µm にあるため、シリコン導波路は 1.3 µm と 1.5 µm を中心とする通信波長帯域 で低損失導波を可能にする。しかし、これらの波長帯においては、禁制帯幅から受光機 能を有するフォトダイオード (Photodiode: PD) をシリコンで形成することは本質的に 困難である。バンドギャップの狭いゲルマニウムは、CMOS 技術にも互換性を有し、PD の基礎材料として注目されている[92]。ただし、シリコン上でゲルマニウムを成長させ るには、2 つの結晶材料間の 4%の格子不整合を補償するための複雑な処理手順が必要 である。GaAs ベースの GaInNAs 量子井戸と InAs 量子ドットは PD の構成材料として [93,94]、追加の選択肢を提供する。そこで、CirD レーザアレイと同じ材料及び構造を用 いて円形欠陥フォトニック結晶 PD アレイを提案する。

円形欠陥フォトニック結晶 PD では円形欠陥共振器の光閉じ込め効果により、光と物 質の相互作用が大幅に増幅され、高速、狭いスペクトル帯域幅検出が可能となる[95]。 複数の共振器と共通の導波路の組み合わせにより、分波器なしで複数の波長信号を処理 できる。同じ GaAs ベースの構造を使用するため、図 2.6 に示すように、CirD レーザア レイと円形欠陥フォトニック結晶 PD アレイをモノリシックに集積でき、超小型な光モ ジュールの実現が期待される。ここで、両方のアレイの端に、スポットサイズコンバー ター (SSC) と位相調整領域がつけられている。SSC は出力導波路とシリコン導波路と 結合する際に、結合効率を向上させるための機能素子である。位相調整領域は端に伝搬 する光の位相を変調する機能素子である。このコンパクトな光モジュールの設置面積は、 約 200 µm×50 µm である。ここで、簡単のために円形欠陥フォトニック結晶 PD アレイ のサイズは CirD レーザアレイのサイズと同じに設計されているが、光吸収の需要に応 じて、PD アレイの共振器を調整することが技術的に十分可能である。



図 2.6: CirD レーザアレイと円形欠陥フォトニック結晶 PD アレイを組み合わせた光モジュ ールの概略図[6]

2.3.3 電子回路への実装

ハイブリッド統合により、必要な光機能素子を最適な技術に基づいて個別に設計、製造、及びテストしてから、組み合わせることができる。フリップチップボンディングは ハイブリッド統合に一般的に使用される技術であり、3D空間を利用するため、2D面内 結合手法より集積度が高い。この方法は位置合わせの精度に対する要求が高いが、適切 なSSCの設計により、精度公差を緩和することができる[96]。そこで、図2.7に示すよ うに、上記の光モジュールをフリップチップによりシリコン基板に実装すれば、非常に コンパクトの光送受信器が構成される。この構成は、将来のチップ内光伝送の伝送容量 密度需要を達成できると期待される。



図 2.7: フリップチップボンディングにより光モジュールをシリコン基板へ実装する模式 図[6]

第3章 円形欠陥フォトニック結晶レー ザの解析

3.1 緒言

CirD レーザでは、円形欠陥共振器と AlGaAs/AlO_x クラッド層の組み合わせを利用す ることにより、空気をクラッド層とする横方向電流注入型フォトニック結晶レーザより も低い電気抵抗と高い熱安定性が得られると予想される。従って、CirD レーザは、エネ ルギー効率、出力、変調速度などの点において優れると期待される。ただし、空気クラ ッド層と比べて、AlGaAs/AlO_xクラッド層は屈折率が高いので、垂直方向の光閉じ込め 効果が弱くなる。従って、円形欠陥共振器の構造を最適化して、レーザ発振に必要な Q値を確保することが重要である。また、WDM を実現するには、十分な波長範囲で、高 Q値を提供する必要がある。そこで本章では、2次元レート方程式を用いて、レーザ発 振に必要なQ値と緩和振動周波数について計算したのち、3次元時間領域差分法 (Finitedifference time-domain method: FDTD 法)を用いて、CirD レーザの各パラメータについ て解析を行う。

3.2 レート方程式による解析

半導体レーザにおける電子と光の相互作用は、キャリア密度(N)と光子密度(S)の 時間変化を記述するレート方程式によって現象論的に扱うことができる。CirDレーザ の場合、垂直方向から注入された電流は、AlGaAsファネルを通してコア層に入り電子 と正孔のキャリアを形成する。そして、キャリアが横方向へ拡散することによりWGM の発振に寄与する。よって、レート方程式を立てる際に、共振器の形状、WGMの光分 布、拡散の影響を考慮する必要がある。そこで本節では、以上のことを踏まえて、2次 元のレート方程式モデルを構築した。ここでは、導波路の影響を考慮せず、円形欠陥共 振器のみの構造について解析を行う。

3.2.1 理論モデルの構築

一般に、半導体レーザにおけるキャリア密度 (N) と光子密度 (S) の時間変化は

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV_{\rm are}} - \frac{N}{\tau_{\rm c}} - \Gamma_z G(N)S \tag{3.1}$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{\tau_{\rm ph}} + \Gamma_z G(N)S + \beta \frac{N}{\tau_{\rm c}}$$
(3.2)

で記述することができる[97]。式 (3.1)の右辺第1項目は電流注入によるキャリアの発 生レートを表す。*I*は注入電流、*e*は素電荷、*V*areは活性領域の大きさである。式 (3.1) の右辺第2項目はキャリアの自然放出再結合、非放射再結合によるキャリアの消滅レー トを表す。τ_cはキャリア寿命である。式 (3.1)の右辺第3項目は誘導放出再結合による キャリアの消滅レートを表す。Γ₂は閉じ込め係数であり、利得媒質が光の分布と重なる 度合を表す。*G*(*N*)は利得関数であり、*N*の関数として、

$$G(N) = \frac{c}{n_{\text{eff}}} g_0 \ln(\frac{N}{N_{\text{tr}}})$$
(3.3)

で表される。cは真空中の光速、neffは活性層の実効屈折率、goは利得係数である。Nutは透明化キャリア密度と呼ばれ、誘導放出確率と誘導吸収確率が等しい時、つまり利得が0になる時点のキャリア密度である。

式 (3.2) の右辺第 1 項目は共振器の漏れと外部への結合による光子の消滅レートを 表す。 τ_{ph} は光子寿命であり、Q値と比例関係であり、

$$\tau_{\rm ph} = \frac{\lambda}{2\pi c} Q \tag{3.4}$$

で与えられる。λは真空中の波長である。式 (3.2)の右辺第2項目は誘導再結合による 光子の発生レートを表す。式 (3.2)の右辺第3項目はレーザモードに寄与する自然放出 による光子の発生レートを表す。βは自然放出係数であり、レーザモードに結合される 自然放出の割合を表す。

CirD レーザにおいて、GaAs コア層の横方向にポテンシャル障壁を作ってないため、 コア層内に生成されたキャリアが横方向へ拡散する。この時に、横方向へのキャリア拡 散は

$$D\nabla^2 N = \frac{dN}{dt}$$
(3.5)

で記述される。ここで、Dは拡散定数である。本研究では、Dを 2×10^3 m²/s に設定した。ただし、空孔が存在する位置における拡散定数Dを0にすることでモデルを構築した。

AlGaAs ファネルを通して注入されたキャリアが WGM の発振に寄与するためには、

拡散時間が必要である。この影響を取り入れるために、誘導再結合の項目に WGM の電場分布の形状を表す関数 $\tilde{E}(x, y, t)$ を追加する。 $\tilde{E}(x, y, t)$ は主に共振器の構造又は共振器の屈折率分布によって決まる。一般に材料の屈折率はキャリア密度 N の増加に従って減少するが[98]、本論文では N が小さいので、この影響が無視できる。従って、レート方程式で解析する際に、 $\tilde{E}(x, y, t)$ を時間に無関係の関数 $\tilde{E}(x, y)$ にすることができる。ここで、 $\tilde{E}(x, y)$ は $\int |\tilde{E}|^2 dxdy = 1$ と規格化されている。

式 (3.5) と $\tilde{E}(x,y)$ を式 (3.1) と (3.2) に代入し、CirD レーザに対するレート方程式

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV_{\rm are}} - \frac{N}{\tau_{\rm c}} - \Gamma_z A_{\rm m} G(N) S \left| \tilde{E} \right|^2 + D \nabla^2 N$$
(3.6)

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{\tau_{\rm ph}} + \Gamma_z \int G(N) \left| \tilde{E} \right|^2 S dx dy + \frac{\beta}{\tau_{\rm c}} \int \left| \tilde{E} \right|^2 N dx dy$$
(3.7)

となる[6,99]。ここで、Amは実効モード領域であり、

$$A_{\rm m} = \frac{\int \left|\tilde{E}\right|^2 dx dy}{\left|\tilde{E}\right|^2_{\rm max}}$$
(3.8)

で与えられる。

式 (3.6) (3.7) を解く際に使用するパラメータを表 3.1 にまとめる。

パラメータ	記号	値
キャリア注入領域	$V_{\rm are}$	$2.23 \times 10^{-20} \text{ m}^3$
キャリア寿命	$ au_{ m c}$	1 ns
閉じ込め係数	Γ_z	0.07
利得係数	g_0	10^5 m^{-1}
拡散係数 (空孔以外のところ)	D	$2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
実効屈折率	<i>n</i> _{eff}	3.4
自然放出係数	β	0.0001
実効モード領域	A_{m}	$9.65 \times 10^{-13} \text{ m}^2$
格子定数	а	340 nm
空孔半径	r	0.3 <i>a</i>
AlGaAs ファネル半径		1.75 <i>a</i>

表 3.1: レート方程式計算に用いたパラメータの値

3.2.2 閾値電流

図 3.1 は Q 値が 500 ~ 7200 の範囲における CirD レーザの閾値電流 I_{th} の変化を示し ている。Q が 500 ~ 2000 の範囲では I_{th} は Q の増加に従って急速に減少し、最初の 80 µA から約 10 µA まで下がり、80%以上の改善が得られた。AlGaAs ファネルの断面積が約 1×10⁸ cm²であることを考慮して、 I_{th} が 10 µA のときの閾値電流密度は 1 kA/ cm² とな る。一方、Q が 2000 より大きい場合、Q の影響が大幅に減少し、 I_{th} はほぼ一定であっ た。以上のことから、目標 Q 値は 2000 に設定することが適切であると考えられる。た だし、この値は、W1 導波路の影響を考慮していない。2.2.3 節で述べたように、共振器 と導波路の結合により Q 値が低下する。従って、W1 導波路のある CirD レーザの Q 値 が 2000 に達するには、円形欠陥共振器自身のQ 値は 2000 より高くする必要がある。



図 3.1: IthのQ値依存性[6]

3.2.3 緩和振動周波数

図 3.2 は電流注入した後、光子密度 *S* の時間変化を表している。ここで、注入電流を 20 μ A、光子寿命 τ_{ph} を 2 ps (*Q* = ~2900) に設定した。図 3.2 から光子密度 *S* は減衰振動 をした後に、定常状態に漸近することがわかる。この固有の振動は緩和振動と呼ばれ、 注入電流の変化に対するキャリア密度 *N* の位相遅れと、光子密度 *S* が光子寿命より速 く変化できないことから生じている[100]。この緩和振動の周波数 *f*_iは

$$f_{\rm r} = \frac{1}{2(t_2 - t_1)} \tag{3.9}$$

で記述され、t₁とt₂はそれぞれ最初のピークとその後の谷の時間である。レーザの変調 速度がf_rを超えると、出力パワーが著しく低下する。一般に、有効な変調帯域幅は出力 パワーが 3 dB に落ちる周波数 f_{3dB} で定義される。ダンピング効果が無視できる場合、 f_{3dB}はf_rの約 1.55 倍である[101]。一方、ダンピング効果が強い場合、f_{3dB}はf_rと同じ程 度になる。



図 3.2: 光子密度 S の時間応答特性

図 3.3 は緩和振動周波数 ft と注入電流 Iの関係を示している。注入電流が増加すると
ともに、 f_r が増大するが、 f_r の増大率が減少することがわかる。注入電流が 400 μ A のと き、 f_r が 39.5 GHz に達した。高速変調を実現するために、CirD レーザを閾値の 10 倍以 上の領域で動作せることになると考えると、ダンピング効果が強く、 f_{3dB} は f_r と同等に なると予想される。ただし、 f_{3dB} が 35 GHz 以下でも 50 Gbps の変調速度に達した報告が あるため[102]、CirD レーザは 50 Gbps の速度で直接変調できると期待される。



図 3.3: 緩和振動周波数 fr と注入電流 Iの関係[6]

3.3 時間領域差分法による光特性の解析

CirD レーザにおける光の振る舞いは Maxwell 方程式によって記述される。FDTD 法 は解析領域全体を微小セルに分割りし、時間と空間に対して差分化することにより、電 磁界の時間変化をシミュレーションする手法である。本節では、先ず、FDTD 法の構成 について紹介する。次に、円形欠陥共振器の理論特性について解析する。最後に、円形 欠陥共振器と W1 導波路の結合について述べる。

3.3.1 時間領域差分法

比透磁率 $\mu(\mathbf{r})=1$ 、導電率 $\sigma(\mathbf{r})=0$ と考えると、電界 $E(\mathbf{r},t)$ と磁界 $H(\mathbf{r},t)$ の関係は、Maxwell 方程式によって、

$$\nabla \times \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = -\mu_0 \frac{\partial \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}$$
(3.10)

$$\nabla \times \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = -\varepsilon_0 \varepsilon(\boldsymbol{r}) \frac{\partial \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}$$
(3.11)

で与えられる。ここで、 μ_0 は真空透磁率、 ϵ_0 は真空誘電率、 $\epsilon(\mathbf{r})$ は比誘電率である。

電界
$$E(\mathbf{r}, t)$$
を x 方向及び時間について差分化すると、 $\frac{\partial E(\mathbf{r}, t)}{\partial x}$ と $\frac{\partial E(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$ は

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)}{\partial x} \approx \frac{\boldsymbol{E}(x + \frac{\Delta x}{2}, y, z, t) - \boldsymbol{E}(x - \frac{\Delta x}{2}, y, z, t)}{\Delta x}$$
(3.12)

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} \approx \frac{\boldsymbol{E}(x,y,z,t+\frac{\Delta t}{2}) - \boldsymbol{E}(x,y,z,t-\frac{\Delta t}{2})}{\Delta t}$$
(3.13)

となる。

FDTD 法では、時間差分間隔 Δt と、セルのメッシュサイズ Δx 、 Δy 、 Δz に関して、

$$\frac{c}{n}\Delta t \le \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}}$$
(3.14)

の関係を満足する必要がある。本論文では、セルのメッシュサイズ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta m =$ 20 nm に、時間ステップ $\Delta t = 3.5 \times 10^{-17}$ s に設定した。

全方向及び時間について中心差分化した電界 *E*(*r*, *t*)、磁界 *H*(*r*, *t*)を式 (3.10) (3.11) に 代入すると、電界 *E*(*r*, *t*)の *x*、*y*、*z* 成分は

$$E_{x}(x, y, z, t) = E_{x}(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{0}\varepsilon(x, y, z)\Delta m} \times [H_{z}(x, y, z) - H_{z}(x, y - \Delta y, z) - H_{y}(x, y, z) + H_{y}(x, y, z - \Delta z)]$$

$$E_{x}(x, y, z, t) = E_{x}(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{0}\varepsilon(x, y, z)\Delta m} \times [H_{z}(x, y, z) - H_{z}(x, y - \Delta y, z)]$$
(3.15)

$$E_{y}(x, y, z, t) = E_{y}(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{0}\varepsilon(x, y, z)\Delta m} \times [H_{x}(x, y, z) - H_{x}(x, y, z - \Delta z) - H_{z}(x, y, z) + H_{z}(x - \Delta x, y, z)]$$
(3.16)

$$E_{z}(x, y, z, t) = E_{z}(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{0}\varepsilon(x, y, z)\Delta m} \times [H_{y}(x, y, z) - H_{y}(x - \Delta x, y, z) - H_{x}(x, y, z) + H_{x}(x, y - \Delta y, z)]$$

$$(3.17)$$

となる。また、磁界 H(r, t)の x、y、z 成分は

$$H_{x}(x, y, z, t) = H_{x}(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\mu_{0} \Delta m} \times [E_{z}(x, y + \Delta y, z) - E_{z}(x, y, z) - E_{y}(x, y, z + \Delta z) + E_{y}(x, y, z)]$$
(3.18)

$$H_{y}(x, y, z, t) = H_{y}(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\mu_{0} \Delta m} \times [E_{x}(x, y, z + \Delta z) - E_{x}(x, y, z) - E_{z}(x + \Delta x, y, z) + E_{z}(x, y, z)]$$
(3.19)

$$H_{z}(x, y, z, t) = H_{z}(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\mu_{0} \Delta m} \times [E_{x}(x + \Delta x, y, z) - E_{x}(x, y, z) - E_{x}(x, y, z)]$$

$$(3.20)$$

で与えられる。

3.3.2 円形欠陥共振器の理論特性

図 3.4 には FDTD シミュレーションに用いた円形欠陥共振器の模式図を示している。 各材料の屈折率 n を表 3.2 にまとめる。本研究では、ドーピングと量子ドットが屈折率 に与える影響は考慮していない。また、計算精度を高めるために、空孔側壁の屈折率は 0.3125 nm のメッシュサイズで平均化されている。酸化幅 wox は、図 3.4 に示すように、 空孔側壁から AlGaAs が酸化された距離を表す。図 3.4 (b) において、共振器内に示す 緑の四角は共振器を励起する場所及び検出する場所を表している。 (a) cross sectional view



図 3.4: 解析に用いた円形欠陥共振器の概略図

材料	屈折率 n
GaAs	3.4
AlGaAs	2.95
AlO _x	1.55
Air	1

表 3.2: 計算に用いた材料の屈折率

FDTD 法は、基本的に閉領域の解析手法である。したがって、CirD レーザを解析する際に、境界に入射した光波が反射することなく境界で吸収されるように、吸収境界条件を設定する必要がある。本研究では Mur の吸収境界条件を用いた[103]。

3.3.2.1 共振波長及び Q 値の計算

先ず、次式のように、複数の sin 波を初期磁界として共振器に与える。

$$H_{z}(x, y, z, t) = H_{z}(x, y, z, t) + \sum_{m} \sin(\omega_{m} t)$$
 (3.21)

ωは光の角周波数であり、波長λと次式のような関係を持つ。

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} \tag{3.22}$$

共振器の励起時間は0~6000Δtに設定した。0から75000Δtまでの電磁界強度を記録し、 フーリエ変換すると、図 3.5のようなスペクトルが得られる。波長 1297 nm 付近のピー クが WGM に対応している。



図 3.5: 磁界スペクトル

次に、WGM の共振周波数をもつ sin 波を初期磁界として共振器に与える。共振器の 励起時間は $0 \sim 6000\Delta t$ に設定した。 $6000\Delta t$ から $75000\Delta t$ まで $100\Delta t$ ごとにコア層全体の エネルギーUを記録する。そして、Qは Uを用いて、

$$\boldsymbol{U}(t) = \boldsymbol{U}(0)\exp(-\frac{\omega t}{Q}) \tag{3.23}$$

で与えられる[89]。図 3.6 は 6000Δt から 75000Δt までの U の時間変化を示す。縦軸は 対数スケールで表している。コア層部分のエネルギーのみを計算しているため、U は振 動している。ただし、コア層部分のエネルギーのみを計算して得られた Q 値は計算領 域全体のエネルギーを計算して得られた Q 値より約 0.2%だけ小さいので、U の振動は Q値に与える影響が無視できる。式 (3.23) により、Q は Uの減衰曲線の傾きに反比例 することがわかる。しかし、図 3.6 から、Uの減衰曲線の傾きは、時間の発展とともに 減少していることがわかる。これは、WGM 以外のモードも励起され、WGM より速く 減衰することに起因すると考えられる。従って、本研究では、Uの減衰曲線のフィッテ ィングは、Uの減衰曲線の傾きが安定している 30000Δt から 75000Δt の範囲で行った。



図 3.6: 初期値を与えた後のエネルギーUの時間変化

3.3.2.2 共振器構造による影響

a)酸化幅の影響

図 3.7 には異なる酸化幅 w_{ox} における WGM の共振波長 λ と共振器半径 R の関係を示 している。ここで、格子定数 a と空孔半径 r はそれぞれ 360 nm、0.3 a に固定している。 λ は R の増加に従って線形的に増加し、 $R = 2.75 a \sim 2.80 a$ の変調範囲で 20 nm 以上の変 調幅が得られた。 λ と R の線形関係から、 λ が共振器の円周長に関係していると考えら れる。 $d\lambda/dR$ は w_{ox} の増加とともに僅かに減少し、 $w_{ox} = 0.6 a$ のとき約 4.95 nm/0.01 a で あり、 $w_{ox} = 1.2 a$ のとき約 4.59 nm/0.01 a である。 w_{ox} の増加とともにクラッド層の実効 屈折率が減少するので、WGM のエネルギーが高くなる。結果として、同じRに対して、 λ は w_{ox} の増加とともに減少する。但し、 w_{ox} の増加とともに λ の減少率も急速に減少す る。 $w_{ox} = 1.2 a$ 以上の場合では、同じRに対して w_{ox} が増加しても、 λ がほぼ一定となっ た。



図 3.7: 異なる酸化幅 wox における共振器半径 R に対する WGM 共振波長 λ の依存性

図 3.8 は異なる酸化幅 wox における WGM の Q 値と共振器半径 R の関係を示している。 $a \ge r$ はそれぞれ 360 nm、0.3 a に固定している。Q 値に対する酸化幅 wox の影響が 波長の場合より複雑となっている。wox が 0.6 a から 0.8 a に増加したところ、すべての R に対する Q が大幅に増加し、Q の平均増加率が 203 %に達した。特に、R = 2.77 a の ≥ 2 、Qの増加率が 382 %になり、wox による影響が最も大きい。wox が 0.8 a から 1.2 a に増加したところ、すべての R に対する Q が減少し、Q の平均減少率が 40 %に達した。R = 2.80 a のとき、Qの減少率が最も大きく、63%である。wox が 1.2 a から 3.2 a (す べての AlGaAs が AlOx になる) に増加したところ、すべての R に対する Q が減少し、Q の平均増加率が 151 %に達した。AlGaAs ファネルの断面積が大きいほうが電 流注入に有利であるため、図 3.8 の結果から、CirD レーザを作製するには、最適な wox は 0.8 a 付近であると考えられる。wox = 0.8 a の条件では、R = 2.75 a のQが最も小さい ので、3.3.2.3 節でQの改善方法を紹介する。



図 3.8: 異なる酸化幅 wox における共振器半径 R に対する Q 値の依存性

b) 格子定数の影響

図 3.9 (a) と(b) はそれぞれ $\lambda \geq Q$ に対する a の影響を示す。 $w_{ox} \geq r$ はそれぞれ 0.78 a、0.32 a に固定している。 λ は a の増加とともに、増加し、すべての R において平均 $d\lambda/da = ~ 14.9 \text{ nm}/5 \text{ nm}$ である。一方、すべての R に対して、a = 355 nm の Q は最も大 きいことがわかる。



図 3.9: 格子定数による影響 (a) WGM 共振波長と (b) Q 値

c) 空孔半径の影響

図 3.10 (a) と(b) はそれぞれ $\lambda \geq Q$ に対する r の影響を示す。 $a \geq w_{ox}$ はそれぞれ 360 nm、(1.1-r)a に固定している。 λ は r の増加とともに、減少し、すべての R において平均 $d\lambda/dr = -12.8$ nm/ 0.02 a である。一方、R = 2.75 a - 2.80 a の範囲で平均した Q は r の増加とともに、増加する傾向を示した。



図 3.10: 空孔半径による影響 (a) WGM 共振波長と (b) Q 値

d) 空孔縮小の影響

CirD レーザでは、空孔のアスペクト比 (空孔直径と空孔深さの比) が約 1:7 であるの で、エッチングで垂直な空孔を得ることは比較的困難である。特に、本研究では InAs 量 子ドットを利得媒質として利用しているので、GaAs コア層に InAs 量子ドット層が含ま れる。従って、空孔をドライエッチングで作製する際に、揮発性の低い InCl₃ が生成さ れることにより、図 3.11 に示すように、コア層部分では空孔が深くなるとともに縮小 し、テーパー状になることが多く観察される[104]。ここで、空孔の垂直率 VR を次式の ように定義する。

$$VR = \frac{D_1}{D_2} \tag{3.24}$$

D₁とD₂はそれぞれコア層の最下部と最上部の空孔の直径を表す。



図 3.11: エッチングでテーパー状になった空孔の概略図

図 3.12 (a) と(b) はそれぞれ λ と Q に対する VR の影響を示す。a、r と w_{ox} はそれぞ れ 360 nm、0.32 a と 0.78 a に固定している。λ は VR の増大とともに、増大し、すべて の R において平均 dλ/dr = 5 nm/ 5% である。R= 2.75 a ~ 2.80 a の範囲で平均した Q は VR が小さくなるとともに、減少する傾向を示した。VR = 95%、90%、85%、80%のとき、 R= 2.75 a ~ 2.80 a の範囲で平均した Q の減少率はそれぞれ、6%、16.9%、29.3%、40.8% である。



図 3.12: 空孔縮小による影響 (a) WGM 共振波長と (b) Q 値

3.3.2.3 共振器構造の改善

前述のシミュレーション結果では、R が 2.75 から 2.80 a の範囲において、WGM の Q 値は R の減少とともに減少する傾向を示した。円形欠陥共振器は 2.2.1 節で説明したよ うに、H3 共振器外周の空孔を円対称に配置することにより構成されている。共振器形 状を円形にすることで、Q 値が大幅に増幅されるが、図 3.13 に示すように、円形共振 器を構成する円形状にならんだ空孔と外側の六角形状にならんだ空孔との距離が不均 ーになった。共振器半径 R が縮小するにしたがって、円形共振器を構成する空孔と周り の空孔と距離が大きくなり、特に六角形の頂点 (図 3.13 に灰色で示す空孔) において、 隙間が最も大きい。つまり、この大きな隙間から、光が漏れる可能性があると考えられ る。そこで、六角形の頂点にある六個の空孔を共振器の中心に向かってシフトさせ、 WGM の変化を調べた。



図 3.13: WGM と空孔との位置関係図

図 3.14 は六角形の頂点にある六個の空孔のシフト量 ws と WGM の共振波長 λ 及び Q 値の関係を示している。a、r、 と wox はそれぞれ 360 nm、 0.32 a、 0.78 a に固定している。 w_s が 0 から 0.3 a まで増加しても、すべての R における波長 λ は一定であり、 w_s の 依存性がないことが示された。これより、WGM の共振波長は円形共振器を囲む空孔の配置で決まることが判明した。一方、 $w_s = 0.1 a$ の場合、すべての R に対して、Q 値は w_s が増加するとともに増加し、光の漏れが抑制されていることが分かる。 w_s が 0.1 a を超えると、すべての R において、Q 値は 5000 より大きい。以上の結果から、表 3.3 に示す構造パラメータを用いて形成した CirD レーザアレイは、20 nm の波長範囲において均一かつ低い閾値電流で発振できると期待される。

パラメータ	記号	値
格子定数	а	360 nm
空孔半径	r	0.32 <i>a</i>
共振器半径	R	2.75~2.80 <i>a</i>
酸化幅	Wox	0.78 <i>a</i>
空孔シフト量	Ws	0.1 <i>a</i>

表 3.3: 20 nm の範囲で 5000 以上の Q が得られる構造パラメータ



図 3.14: 空孔シフト wsによる影響 (a) WGM 共振波長と (b) Q 値

3.3.3 共振器と導波路の結合

一般に、共振器と導波路の光結合強さは式 (3.25) に示す結合効率 η で表される[105]。

$$\eta = \frac{\frac{1}{Q_{\text{total}}} - \frac{1}{Q_{\text{res}}}}{\frac{1}{Q_{\text{total}}}}$$
(3.25)

 Q_{total} は共振器と導波路を含めた構造のQ値を表し、 Q_{res} は導波路なしで共振器のみ構造のQ値を表す。 η は CirD レーザを設計する際に低閾値を維持しながら高出力を得るための重要なパラメータである。CirD レーザでは、導波路を共振器と結合させるために、図 3.15 に示すように、導波路幅を狭める方向に導波路両側の空孔をシフトさせる必要がある。シフト量は Δs で表す。これは、導波モードのエネルギーを WGM と一致させるためである[89]。導波路と共振器の結合効率は両者の距離にも関連する[106]。また導波路と共振器の距離は、導波路から共振器まで空孔の列数を N_{sep} で表す (図 3.15)。 導波路が共振器に近づくに従って、結合効率が増大するが、 Q_{total} 値も減少する[89]。結合効率とQ値のトレードオフを考慮して、本研究では、 N_{sep} を3に設定している。



図 3.15: 導波路両側の空孔をシフトさせる模式図

図 3.16 には、異なる半径の円形欠陥共振器に対して、 Δs と結合効率 η の関係を示している[89]。 Δs の増大、すなわち導波路幅を狭めるに従って、導波モードのエネルギーが高くなるが、この導波モードと WGM のエネルギーが最も一致するときに、 η が最大となる。また、WGM のエネルギーが R に依存するため、それぞれの R に対して、最大の η を得られる Δs が異なる。 Δs を固定して、目標の η を 0.2 に設定すると、W1 の導波路の帯域幅は約 10 nm になる[89]。



図 3.16: 異なる半径の共振器において、Δs と結合効率 η の関係[89] © 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

第4章 要素技術

4.1 緒言

本章では、要素技術として本研究に関係する半導体微細加工技術について述べる。具体的に、2次元フォトニック結晶構造の作製に必要な電子線 (Electron beam: EB) リソグ ラフィーとドライエッチングについて述べる。

4.2 電子線リソグラフィー

リソグラフィーはさまざまな基板にパターンを形成するために使用される技術であ る。まず、基板の表面に感光性材料(レジスト)の膜を形成する。そして、レジスト 膜に紫外線光、X線、EBなどのエネルギー線を照射して、レジスト膜に設計したパタ ーンの潜像を形成する。最後に、潜像は、現像液を使用して現像され、レジスト膜に設 計のパターンを形成する。リソグラフィーは2つのタイプに分類できる。1つは、フ オトマスクから基板上のレジストに幾何学的パターンを転写するために光を使用する ものである。これは光リソグラフィーまたはUVリソグラフィーと呼ばれている。も う1つは、集束したEBを使用して、スキャンによってレジストに設計パターンを描画 するものである。これをEBリソグラフィーと呼ぶ。光リソグラフィーに比べ、EBリ ソグラフィーは、解像度が高いので、微細パターンを容易に得られるが、パターンを一 つーつ描画するため大量生産に向かないという欠点がある。本研究ではフォトニック結 晶パターンを形成するには、EBリソグラフィーを用いた。EBリソグラフィーの工程を 図 4.1 に示す。以下で各手順について説明する。



図 4.1: EB リソグラフィー工程の模式図

先ず、エタノールとアセトンの超音波洗浄により、基板に付着した油や微細な塵と汚 れなどを取り除く。その後、レジストを基板上に塗布する。レジストの厚みは空孔のサ イズに影響するため、基板上に均一なレジスト膜を堆積する必要がある。一般的に、ス ピンコーターを用いてレジストを塗布する。塗布されるレジストの厚みはスピンコータ ーの回転数と関係し、スピンコーターの回転数を下げるとレジストの厚みが大きくなる。 本研究では、レジストとして、解像度が高く、エッチングに対する耐久性が優れたポジ 型レジスト ZEP520A(日本ゼオン製)を用いた。次に、レジストの固化のために、基板 をホットプレートの上に載せ、プリベークを行う。その後、EB リソグラフィー装置を 用いてレジストに EB を照射しパターンを描画する。描画パターンは、CAD によって設 計される。最後に、EB 描画後の基板を現像液とリンス液に順に浸し、EB に照射された 部分を取り除く。

4.2.1 装置仕様

フォトニック結晶構造を描画する際に、形成された空孔半径rは単位面積あたりの電子の注入量を表すドーズ量Deと関連する。ドーズ量Deは、電子の照射時間Te、ビーム電流Le、と分解能Aeで決まる。これらの変数は、式(4.1)に示す関係を持つ。

$$D_{\mathbf{e}} = \frac{I_{\mathbf{e}} \times T_{\mathbf{e}}}{A_{\mathbf{e}}^2} \tag{4.1}$$

分解能 Aeはフィールドサイズ Feとドット数 Neで決まる。これらの変数は、式 (4.2) に示す関係を持つ。

$$A_{\rm e} = \frac{F_{\rm e}}{N_{\rm e}} \tag{4.2}$$

本研究の試料の作製に用いた EB リソグラフィー装置は、ELS-3700S (エリオニクス 製)、ELS-100T (エリオニクス製) の 2 つである。ELS-3700S は近藤研が持つ装置であ り、ELS-100T は大阪大学の微細加工プラットフォームにある装置である。それぞれの 装置における仕様を表 4.1 に示す。

2 つの装置の異なる点の一つとして、加速電圧が ELS-3700S が 30 kV であるのにに対 し ELS-100T が 125 kV と高いことが挙げられる。レジストに垂直に入射した EB は、主 に垂直方向に進行するが、レジストの構成原子と衝突、散乱するため横方向にも広がる。 従って、入射位置とずれた箇所のレジストにもエネルギーが堆積される。このような現 象を近接効果と呼ぶ。それによって、パターンの寸法が設計値より大きくなってしまう。 特に、フォトニック結晶構造の場合、隣接する空孔同士が繋がってしまう恐れがある。 加速電圧が高いほうが、入射した EB のレジスト近傍での広がりが小さいため、ELS-100T は ELS-3700S より近接効果の影響が小さい。一方、意図的に近接効果を利用して、 照射時間 *T*。を変えることにより空孔半径*r*を制御する方法もある。

2 つの装置のもう一つの明確に異なる点は限界分解能である。ELS-3700S 装置限界の 分解能は 5 nm ($F_e = 100 \mu m$, $N_e = 20000$) であるのに対して、ELS-100T は 0.078 nm ($F_e = 75 \mu m$, $N_e = 960000$) である。分解能を小さくするとともに描画の精度が高くなるが、 描画に必要な時間も大幅に増加する。CirD レーザの研究はまだ初歩の段階にあり、数 多くの試料を作製し、レーザ特性を調べる必要があるため、時間の制約を考慮して本研 究では ELS-100T の分解能を 2.5 nm ($F_e = 150 \mu m$, $N_e = 60000$) に設定して描画を行った。 また、第5章では光特性評価用の試料作製に高精度が必要のため、ELS-100T を用いた が、第6章で述べるフォトニック結晶やパッド電極などの描画は、分解能が5 nm でも +分対応できるので、ELS-3700S を用いた。それぞれの装置に対して、最適なドーズ量 D_e が異なる。ELS-3700S は約 60 μ C/cm²、ELS-100T は約 180 μ C/cm²である。

装置型番	ELS-3700S	ELS-100T
加速電圧 (kV)	30	125
フィールドサイズ Fe(µm□)	100, 500	75, 150, 300
ドット数 Ne	20000	60000, 240000, 960000

表 4.1: EB リソグラフィー装置の仕様

4.2.2 高精度描画について

第5章における実験は ELS-100T を用いて、分解能を 2.5 nm (F_e =150 µm、 N_e =60000) に設定して行ったが、将来的には CirD レーザ研究の発展により、さらに高精度が要求 されると予想される。そこで、本節では、さらに小さい分解能で描画する方法について 述べる。

式 (4.2) に示すように、フィールドサイズ F_e を小さくすること、または、ドット数 N_e を大きくすることにより、分解能を小さくすることができる。例として、分解能 1.25 nm (F_e = 75 µm、 N_e = 60000) の描画方法について述べる。フィールドサイズ F_e が半分になるに従って、式 (4.1) の右項の分母が元の値の 1/4 になる。式 (4.1) の左項のドーズ量を一定に保つためには、式 (4.1) の右項の分子を元の値の 1/4 にする必要がある。つまり、照射時間 T_e とビーム電流 I_e の積を元の値の 1/4 にする必要がある。ここで、装置には最小の照射時間が存在することに注意する必要がある。例えば、ELS-100T の最小照射時間が 0.06 µs であるので、照射時間 T_e を 0.05 µs に設定しても、実際に実行された照射時間は 0.05 µs ではなく、0.06 µs になる。それによって、空孔半径が大幅に増大し、空孔同士が繋がってしまうおそれがある。そこで、分解能が 1.25 nm (F_e = 75 µm、 N_e =

60000) で描画する際に、ビーム電流 $I_e & 25$ pA に設定し、照射時間 $T_e & 0.1 - 0.14$ µs として描画を行った。図 4.2 (a) と (b) はそれぞれ、ドーズ時間 T_e が 0.1 µs と 0.14 µs で作製したフォトニック結晶構造の上面 SEM 像を示している。フォトニック結晶構造 が綺麗に描画されたことがわかる。ここで、設定された格子定数 a と空孔半径 r はそれ ぞれ 360 nm と 100 nm である。図 4.2 (c) は、実測した空孔半径 r とドーズ時間 T_e の関 係を表している。エラーバーは標準誤差を表す。ドーズ時間 T_e が 0.1 µs と 0.11 µs の場 合、空孔半径 r が約 0.32 a であり、0.12 µs と 0.13 µs の場合、空孔半径 r が約 0.33 a で あり、0.14 µs の場合、空孔半径 r が約 0.34 a である。全体的に、ドーズ時間 T_e が増大 するとともに、空孔半径 r が増大する傾向を示した。こうして、ビーム電流 I_e を小さく すれば、さらに高い分解能で描画できることが判明した。



図 4.2: (a) 分解能が 1.25 nm の条件に基づいて、ドーズ時間 0.1 µs で作製したフォトニック 結晶構造の上面 SEM 像、 (b) 分解能が 1.25 nm の条件に基づいて、ドーズ時間 0.14 µs で 作製したフォトニック結晶構造の上面 SEM 像、(c) 実測した空孔半径 r とドーズ T_e時間の 関係図 (エラーバー:標準誤差)

4.3 ドライエッチング

CirD レーザでは、空孔の縮小が Q 値の低下をもたらすため (3.3 節参照) 、空孔の垂 直異方性加工が求められている。この要求を満たすために本研究で利用するのは、反応 性イオンエッチング (Reactive Ion Etching: RIE) と呼ばれるドライエッチング方法であ る。本節では、この RIE エッチング技術について説明する。

4.3.1 エッチングメカニズム

RIE ドライエッチングでは、化学的エッチングと物理的エッチングを組み合わせるこ とで、垂直性の高い異方性エッチングが実現される。化学的エッチングは、主として、 プラズマ励起によって生成された活性種 (ラジカル)によってなされ、物理的エッチン グはイオンによってなされる。化学的エッチングは化学反応が支配的であるため、試料 内の分子と原子の結合を切断するのに十分なエネルギーを提供する必要がある。このエ ネルギーをイオンに与えることで、イオンの入射方向に向かって試料とラジカルの反応 速度を劇的に上げることができる。また、イオンを反応生成物に衝突させることで、試 料からの生成物の脱離も促進される。これはイオンアシスト効果と呼ばれ[107]、垂直性 の高い異方性を得るために重要な役割を果たしている。

RIE のプラズマ源として、容量結合プラズマ(Capacitively-Coupled Plasma: CCP)、誘 導結合プラズマ(Inductively Coupled Plasma: ICP)と電子サイクロトロン共鳴(Electron Cyclotron Resonance: ECR)の3種類が主に用いられている。ICPとECRは、CCPと比 較して低圧力で高密度なプラズマを生成可能で、イオンフラックスとイオンエネルギー を独立に制御可能という特徴がある[108]。本研究では、ICP エッチング装置(CE-300I: ULVAC 製)を用いた。

ICP の発生方式を図 4.3 に示す。エッチングチャンバーの外側にあるコイルを通して

高周波 (Radio Frequency: RF) 電流を印加することにより、チャンバー内に高周波磁界 ができる。電磁誘導によって、この高周波磁界の時間変化に比例した電界が発生する。 電子は電界の変化に追従でき、激しく運動するが、イオンは追従できず、平均電界に対 して運動することとなる。従って、加速された電子とガス分子は衝突し、エッチングチ ャンバー内でプラズマが発生する。プラズマがエッチングチャンバーや電極、試料に接 する部分ではシース (Sheath) と呼ばれる発光しない部分がある。発光部分では平均電 位は巨視的には一定だが、シース部分では平均電位は電極からの距離によって変化する。 RF 周波数帯ではプラズマ中の電子の速度がイオンの速度に比べて圧倒的に高く、プラ ズマ中から電子が速く無くなるためにプラズマ中に正電荷が残る。よって、プラズマ中 の平均電位は高くなる。そして、下部電極は、ブロッキングコンデンサ CB により、次 第に負の電位にバイアスされていく。こうしてできた電圧差が自己バイアス電圧 Vppで あり、この電圧でイオンが加速され、試料表面に垂直に衝突することにより前述のイオ ンアシスト効果が得られる。



図 4.3: ICP によるドライエッチング

4.3.2 エッチングガス組成

本研究では ICP-RIE によってエッチングを行う材料は主に GaAs、AlGaAs である。こ れらに対して効果的にエッチングできるガスとして、Cl₂がある。Cl₂は GaAs や AlGaAs と反応して塩化物(GaCl₃、AlCl₃、AsCl₃)を生成するが、これらの反応物は蒸気圧が高く、 容易に揮発して試料表面から取り除くことができる。しかし、AlGaAs 中の Al がエッチ ング中に容易に酸化されて AlO_x となり、AlO_x は Cl₂ と反応しないためエッチングの進 行を止めてしまう。そこで、Al をエッチングする際は、生成された AlO_x を Al に還元す るために BCl₃を導入することがある[109]。 異方的なエッチングを実現するために、側壁保護膜を生成するガスを導入する必要が ある[110,111]。側壁保護膜とは、エッチングで生成した不揮発性の生成物、スパッタリ ングされたレジストが再度付着したものや、エッチングガスの解離や再結合で得られる ポリマーなどによって側壁に付着する膜のことである。側壁保護膜は化学反応によるエ ッチングを阻害し、横方向への過度なエッチングを防ぐことができ、特にアスペクト比 の高いエッチングを行う場合に必要になる。一方で側壁保護膜が多すぎるとエッチング の形状がテーパー状になり、垂直性は悪くなる場合もある。本研究では側壁保護膜を生 成することを目的として CH4を導入した。

4.3.3 他の制御パラメータ

ガス組成以外に重要なパラメータを以下に示す。

4.3.3.1 アンテナ電力

アンテナ電力は、プラズマ密度に影響する。ラジカルの発生率も電子密度にほぼ比例 して増加するため、ラジカルの密度も放電電力とともに増加する。アンテナ電力の制御 は化学エッチングと物理エッチングのバランスを取るための重要なパラメータである。

4.3.3.2 バイアス電力

バイアス電力は、異方性エッチングにおけるイオンアシスト量、エッチング面のダメ ージを制御する重要なパラメータである。ICP エッチング装置では、バイアス電力が高 くなるに従って、V_{pp} が高くなり、試料に到達するイオンのエネルギーも高くなる。従 って、物理エッチング効果が増幅される。物理エッチングは試料だけを対象にするので はなく、レジストも対象にするため、レジストの耐性を考慮して、バイアス電力の調整 が必要である。

4.3.3.1 プロセス圧

プロセス圧は放電中の圧力であり、イオンの平均自由行程に関連する。平均自由行程 とは、粒子が衝突してから次の衝突まで進行する距離の平均値のことである。プロセス 圧が下がれば、そこに存在する分子の数が減少するので、平均自由行程は大きくなる。 イオンはシース部分の電界で加速されるので、加速中にイオンが他の粒子と衝突すると、 散乱が発生し、方向性が失う。そのため、イオンの平均自由行程がシース幅より大きい 必要がある。プロセス圧力としては 1Pa 以下が良く使われる。

4.3.3.2 PFC Press

試料はSiウェハの表面に貼り付けて、装置の中に搬送されている。PFC (Pressure Flow Controller) Press は、エッチング中にSiウェハの裏面に流すHeの圧力である。He ガス はウェハを冷却し、イオンの衝撃を受けてプロセス中に温度が上がった基板の温度を下 げることができる。本研究ではHe の圧力を 300 Pa としている。設定できるパラメータ ではないが、このパラメータに関連して PFC Flow という He がどれだけチャンバーに 漏れているかを示すパラメータを、エッチング中に確認できる。この値が1.0 sccm より も高いと、エッチングに悪影響を及ぼす可能性があるため留意する。

第5章 円形欠陥フォトニック結晶レー ザの光学特性評価

5.1 緒言

本章では、第3章での理論解析結果をもとに、実際に光励起によりRT-CWの条件で、 CirD レーザの光学特性の評価を行う。本章では、2 種類の構造の異なる CirD レーザに ついて報告する。一つは、図 5.1 (a) に示す、Air と AlO_xをクラッド層とする構造であ る。この構造では、電流注入に必要な p-GaAs コンタクト層と上部 AlGaAs/AlOx クラッ ド層がないため、エッチングが容易となり、高い垂直率の空孔が得られる。また、この 構造では、p-GaAs コンタクト層による励起光の吸収及び反射がなくなる。従って、こ の構造は、上面からの発光も比較的強くて、上面光特性測定が可能である。さらに、コ ア層の上部が空気なので、断面における2次元光分布を測定することにより、光の出射 位置を調べることが可能である。従って、電流注入 CirD レーザを実現する前段階とし て、この種類のレーザを作製し、断面発光測定、上面発光測定及び断面における2次元 光分布測定を実施した。5.3 節では、この種類の CirD レーザの光特性について述べる。 もう一つは、図 5.1 (b) に示す、2 層 AlOxをクラッド層とする構造である。この構造は 共振器中心部分の AlGaAs も AlO_xに酸化されている以外は、図 2.1 の電流注入型 CirD レーザの構造と同様である。従って、この構造では、深堀りエッチングが必要となる。 5.4節では、最適化したエッチング条件により作製したこの種類の CirD レーザの断面発 光特性について述べる。



図 5.1: 光学特性評価に用いた二種類の CirD レーザの概略図 (a) air/AlO_x クラッド層構造と (b) 2 層 AlO_x クラッド層構造

5.2 測定系

図 5.2 (a) と (b) にはそれぞれ本実験で用いる光特性測定系の模式図と実物図を示 す。光励起用の光源として、波長が 785 nm の半導体レーザ (Oxxius 社製) を用いた。 励起光は ND フィルターとミラーを経由し、50×の対物レンズ (開口数: 0.55) によって 集光された後、垂直方向から試料に入射する。共振器から出た光は、発光方向によって 断面発光と上面発光に分けられる。断面発光は、先球ファイバーによって収集され、上 面発光は同じ対物レンズによって収集される。先球ァイバーの位置合わせには、ピエゾ ポジショナー (Piezosystem jena 社製) を用いた。スペクトルを測定するには、0.07 nm の 高分解能を持つ光スペクトルアナライザー (Optical Spectrum Analyzers: OSA, MS9710B アンリツ社製) と 0.54 nm の分解能を持つ高感度の分光器 (Z-300 Series Monochromator: ルシール社製) を用いた。すべての測定は RT-CW の条件で行った。





Spherical Lensed Fiber

図 5.2: CirD レーザの光特性測定系の (a) 模式図と (b) 実物図

測定系には、図 5.2(b) に示すように、観察と測定の2つのモードがある。観察モー ドは、図 5.3 に示すように、モニタを見ながら試料と先球ファイバーの位置を確認する モードである。測定モードは共振器を励起し、光特性を測定するモードである。ただし、 測定モードでは、試料やファイバーが見えない。従って、実際の測定では、先球ファイ バーと試料の位置あわせは、先球ファイバーと試料が見えない状態で、ファイバーを移 動しながら、最大のパワーが得られる位置に合わせるように行う。また、モニタに試料 をはっきりと写すために、観察モードで試料の高さを調整し、焦点を合わせた。焦点が 合った場合、図 5.4 (a) に示すように、励起光のスポットサイズが約 2 µm になる。しか し、色収差のため、観察モードから測定モードに切り替えると焦点のずれが発生し、図 5.4 (b) に示すように、集光スポットサイズが約 3 µm に拡大される。観察モードから測 定モードへの切り替えは顕微鏡の鏡筒を手動で機械的に行うため、切り替える際に試料 の位置ずれ (< 1 µm) が発生する恐れがある。共振器の直径が約 2 µm であることを考 慮すると、3 µm のスポットサイズであるためにより大きな許容範囲を与えてくれる。



図 5.3: モニタから見た試料と先球ファイバーの様子



図 5.4: (a) 観察モードで焦点を合わした状態の励起スポットの様子、 (b) 観察モードから 測定モードに切り替えた後の励起スポットの様子

5.3 Air/AlO_xクラッド層レーザの光特性

5.3.1 作製手順

試料は図 5.5 に示す手順で作製した。

- 分子線エピタキシー法 (Molecular Beam Epitaxy: MBE) を利用して、n-GaAs の基 板に 500 nm の Al_{0.95}Ga_{0.05}As クラッド層と 220 nm の GaAs コア層を順に成長させ る。GaAs コア層の中に、利得媒質として、3 層の InAs 量子ドット層が含まれて いる。InAs 量子ドット層の発光ピークは約 1290 nm にある。
- 基板をエタノールで洗浄し、スピンコートによりポジ型レジスト (ZEP520A:日本 ゼオン社製)を塗布する。スピンコート後は、180℃のホットプレートに乗せ、 180秒間のプリベークを行う。次に、EBリソグラフィー (ELS-100T: エリオニク ス社製)により CirD レーザパターンを描画する。描画条件を表 5.1 にまとめる。 その後、24℃の恒温槽で 90 秒間の現像 (ZED-N50:日本ゼオン社製)とリンス (ZMD-B:日本ゼオン社製)を行う。

表 5.1: Air/AlOx クラッド層 CirD レーザの EB 描画の条件

装置型番	ELS-100T
加速電圧 (kV)	125
フィールドサイズ Fe(µm□)	150
ドット数 Ne	60000
ビーム電流 <i>I</i> e (pA)	100
ドーズ量D _e (µC/cm ²)	180

- レジストをマスクとして、表 5.2の条件でドライエッチング (CE-300I: アルバッ ク社製)を行う。
- 4. 試料をリムーバー (ZDMAC: 日本ゼオン社製) とエタノールで超音波洗浄し、レジストを除去する。
- 試料を酸化炉に入れ、H₂O/N₂雰囲気で加熱することにより、AlGaAs 層を完全に AlO_xに酸化させる。酸化の際の窒素流量、酸化温度、及び酸化時間は、それぞれ、 1.0 L/min、390°C、及び 60 分に設定した。


図 5.5: Air/AlOx クラッド層 CirD レーザの作製手順

Cl ₂ 流量 (sccm)	12
BCl ₃ 流量 (sccm)	18
CH4 流量 (sccm)	1
アンテナ電力 (W)	300
バイアス電力 (W)	23
プロセス圧 (Pa)	0.6
PFC Press (Pa)	300
チラー温度 (°C)	20
エッチング時間 (s)	50

表 5.2: Air/AlOx クラッド層 CirD レーザのエッチングの条件

以上の手順で作製した試料の一例を図 5.6 に示す。図 5.6 (a) から実測した格子定数

aと空孔半径 r はそれぞれ 395 nm、115 nm である。



図 5.6: 作製した試料 SEM 図: (a) 上面図 (b) 俯瞰図 [6]

5.3.2 共振器特性

図 5.7 は出力光パワーに対する励起光パワー依存性を示している。レーザ発振の特徴 的な現象として、曲線に明確な曲がりが観察され、点線のフィッティングから推定した 閾値パワー $P_{\rm th}$ は約 25 μ W である。GaAs の表面における励起光反射率を 30%とし、GaAs の吸収係数を 10 000 cm⁻¹ とすると[27]、励起光に対する GaAs コア層の吸収率は約 14% となる。従って、実質の閾値パワー $P_{\rm eff}$ は約 3.5 μ W である。CirD レーザの閾値電流 $I_{\rm th}$ は、次の式

$$P_{\rm eff} = I_{\rm th} \times \frac{hc}{e\lambda} \tag{5.1}$$

から、約 3.6 μ A と推定され、LEAP レーザの 4.8 μ A より小さい[112]。ここで、hはプ ランク定数であり、 λ は 1.3 μ m とした。以上のことから、電流注入 CirD レーザの閾値 電流が極小となることが期待できる。



図 5.8 は、RT-CW の条件で閾値を超えて励起した試料の断面発光のスペクトルを示 している。断面発光を測定するには高分解能の OSA を利用した。図 5.8 から、1311 nm 付近に WGM の鋭い発光ピークが観察され、ピークの線幅が OSA の分解能の 0.07 nm に達した。FDTD の理論計算結果により、誘導放出及び吸収を考慮せず、自然放出のみ による最小の線幅は約 0.2 nm である。実験で得られた線幅はこの値よりさらに小さい ことから、レーザ発振していることが明らかである。測定を行った 50 nm の範囲で WGM の単一モード動作が観察され、サイドモード抑制比 (Side Mode Suppression Ratio: SMSR) は約 20 dB である。

図 5.9 は、RT-CW の条件で閾値を超えて励起した試料の上面発光のスペクトルを示 している。上面発光を測定するには高感度の分光器が利用された。図 5.8 と同じように 1311 nm 付近に WGM の鋭いピークが観察され、WGM の線幅が分光器の分解能 0.54 nm に達した。また、WGM 以外に、図 5.9 から S1~S4 の 4 つのサイドモードも観察され た。これらのモードは線幅が大きいことから、*Q*値が低く、発振していないと考えられ る。また、図 5.8 の結果と比較して、S1~S4 は主に垂直方向へ放射するモードであるこ とがわかる。



図 5.9: 垂直方向における発光スペクトル (分光器により分析) [113] © 2018, IEEE

図 5.10 は実験によって得られた WGM の共振波長 λ と共振器半径 R の関係を示している。 λ は R の増加に従って増加し、R が 2.75~2.80 a の範囲では 20 nm 以上の変調幅が得られた。また、図 5.10 では、R の増加とともに、 $d\lambda/dR$ も増加する傾向を示し、 λ と R の関係は線形関係からずれている。これは主に上下非対称クラッド層構造に由来すると考えられる。その理由は 5.4.2 節に述べる上下対称の二層 AlO_x クラッド層構造では、図 5.18 に示すように、 λ と R は直線関係となっているからである。



図 5.10: WGM の共振波長 λ と共振器半径 R の関係図[113] © 2018, IEEE

5.3.3 断面の2次元光分布測定

図 5.10 に示すように、Air と AlO_xクラッド層構造では、20 nm の範囲に渡って WGM のピークが観察された。しかし、この範囲は 3.3.3 節に述べた 10 nm の理論帯域幅より さらに大きくなっていた。従って、測定した WGM が導波路と結合したものだけではな い可能性がある。このことを解明するために、図 5.11 に示すように、試料のへき開断 面 (xz 面) に対して、先球ファイバーを移動させ、xz 面の 2 次元光分布を調べた。ここ で、x 軸に対して W1 導波路から共振器に向かう方向が正方向である。



図 5.11: 先球ファイバーを用いて試料へき開断面(xz面)の光分布を測定する模式図

図 5.12 (a) は xz 面の 2 次元光分布測定に用いた試料の上面図を示している。実測した格子定数 a、空孔半径 r と共振器半径 R はそれぞれ 358 nm、0.3 a と 2.75 a である。 この試料の断面から得られたスペクトルは xz 方向の位置によって変わり、ある xz 座標では、図 5.12 (b) に示すように、1275 nm と 1310 nm 付近の 2 つのピークが観察されることもある。1310 nm 付近にあるピークは WGM に対応する。1275 nm 付近にあるピ ークをモード X とする。図 5.13 (a) と (b) はそれぞれ WGM とモード X の xz 面の 2 次元光分布を示している。x 方向のファイバー移動範囲は 12 μ m、z 方向のファイバー移動範囲は 11 μ m、ファイバーの移動精度は 1 μ m である。図 5.13 から、この 2 つのモードの最大の強度が得られる xz 座標が異なることがわかる。WGM とモード X の最大の強定が得られる xz 座標をそれぞれ (x1, z1)、 (x2, z2) とすると、x1-x2=1 μ m、z1-z2=-2 μ m となっている。



図 5.12: xz 面の 2 次元光分布測定に用いた試料の (a) 上面図、(b) ある xz 座標におけるスペクトル



図 5.13: (a) WGM と (b) モード X の xz 面の 2 次元光強度分布

WGM とモード X の最大強度が得られる座標のずれから、断面における WGM とモード X の出射位置について図 5.14 に示す二つの可能性が考えられる。可能性 1 は、図 5.14 (a)に示すように、断面における WGM の出射位置が導波路、モード X の出射位置

が共振器のない導波路の片側にあるコア層の上方である。可能性2は、図 5.14(b)に示 すように、断面におけるモードXの出射位置が導波路で、WGMの出射位置が AlO_xク ラッド層下の n-GaAs 層である。断面におけるモードXの出射位置は、コア層の上方に あるとしたら、共振器の垂直の上方から出る光経路が最も近い経路となるため、モード Xの最大強度が得られる位置は共振器の垂直上方になるべきである。可能性1はこのこ とと反するため、成立しない。従って、可能性2が可能性1より合理的である。つまり、 断面における WGM の出射位置が AlO_xクラッド層下の n-GaAs 層であり、モードXの 出射位置が導波路である可能性が高い。励起スポット径が約3 µm あり (5.2 節参照)、 共振器と導波路の両方が励起されている可能性があるため、モードX は励起された導 波路モードであると考えられる。



図 5.14: WGM とモード X の出射位置の模式図 (a) 可能性 1 (b) 可能性 2

以上の結果から、W1 導波路と共振器の結合が弱いことがわかる。これは、主にW1 導波路の帯域幅が狭いことに起因すると考えられる。これを改善するために、新たな導 波路構造が提案された[114]。この導波路構造は三角格子の単一列の空孔を格子定数半 分だけシフトさせることで形成されており、W1 導波路より広い帯域幅を持つので、W1 導波路とWGM との結合が弱いことを解決できると期待される。一方、測定したWGM が導波路から出射されたものではない可能性があるが、5.3.2 節の結果から円形欠陥共 振器自体は低閾値動作、単一モード発振、波長制御可能の光特性を有していることは間 違いない。

5.4 二層 AlO_x クラッド層レーザの光特性

5.4.1 作製手順

二層 AlO_xクラッド層 CirD レーザの作製は 5.3.1 節のと基本的に同じである。ただし、 コア層の上に、500 nm の p-AlGaAs クラッド層と 180 nm の p-GaAs コンタクト層が追加 されたため、高アスペクト比の深堀りエッチングが必要となる。表 5.3 には深堀りエッ チング条件を示している。深堀りエッチングは 3 つのステップに分けて行われていた。 ステップ 1 の条件は p-GaAs コンタクト層及び p-AlGaAs クラッド層を、ステップ 2 の 条件は GaAs コア層を、ステップ 3 の条件は n-AlGaAs クラッド層をエッチングする条 件である。InAs 量子ドットを含むコア層部分の空孔の垂直率を上げるには、CH4流量を 減少することが有効であるため[104]、ステップ 2 では CH4の流量を 1 sccm に設定した。

	Step 1	Step 2	Step 3
Cl ₂ 流量 (sccm)	12	12	12
BCl ₃ 流量 (sccm)	18	18	18
CH4 流量 (sccm)	3	1	3
アンテナ電力 (W)	300	300	300
バイアス電力 (W)	20	20	20
プロセス圧 (Pa)	0.6	0.6	0.6
PFC Press (Pa)	300	300	300
チラー温度 (°C)	20	20	20
エッチング時間 (s)	135	100	130

表 5.3: 深堀りエッチングの条件

図 5.15 は作製した試料の一例を示し、実測した格子定数 a と空孔半径 r はそれぞれ 375 nm、135 nm である。空孔の垂直率 (コア層下部の空孔直径とコア層上部の空孔直径 の比) は約 90%である。



図 5.15: 作製した試料 SEM 図: (a) 上面図 (b) 断面図

5.4.2 共振器特性

本節では、共振器特性の測定を 5.2 節で述べたように行った。

図 5.16 は典型的な出力光パワーの励起光パワー依存性を示している。曲線に明確な 曲がりが観察され、点線のフィッティングから推定した閾値パワーP_{th}は約 50 µW であ る。Air/AlO_xクラッド層場合と比べて、閾値パワーは約 2 倍高くなっていた。これは、 主に追加した GaAs コンタクト層による吸収と反射に起因する実質の励起パワーの低下 と考えられる。閾値を超えた後、出力パワーが励起パワーの増加とともに線形的に増加 し、約 600 µW まで飽和しなかった。励起パワーを 12 µW から 900 µW に増加すると、 WGM の共振波長は 0.27 nm 増大した。



図 5.16: 出力パワーと励起光パワーの関係図

図 5.17 は、RT-CW の条件で閾値を超えて励起した試料の断面発光のスペクトルを示 している。図 5.17 から、1291 nm 付近に WGM の鋭い発光ピークが観察され、ピーク の線幅が OSA の分解能の 0.07 nm に達した。図 3.8 において、全面酸化の場合、R = 2.75 a の Q 値は最大となり、約 13000 である。よって、誘導放出及び吸収を考慮せず、 自然放出のみによる最小の線幅は約 0.1 nm である。実験で得られた線幅はこれよりさ らに小さいことから、レーザ発振していることが明らかである。測定を行った 50 nm の 範囲で WGM の単一モード動作が観察され、SMSR は約 28 dB である。5.3 節の試料と 比べて、二層 AlO_xクラッド層 CirD レーザの SMSR が大幅に改善された。これは、主に 上下対称のクラッド層がもたらした効果だと考えられる。この結果に加えて、上下クラ ッド層の共振器中心部分を AlGaAs のまま保つ場合は、共振器の中心に強度が分布する 他の共振モードも抑制されるため、実際の電流注入型 CirD レーザでは SMSR がさらに



図 5.17: 断面発光スペクトル (OSA により分析)

図 5.18 は WGM の共振波長 λ と共振器半径 R の関係を示している。 λ は R の増加に 従ってほぼ線形的に増加し、R が 2.75 ~ 2.81 a の範囲で、28 nm 以上の変調幅がえられ た。 λ と R の直線近似から、 $d\lambda/dR = ~ 4.66$ nm/0.01 a が得られ、3.3 節の FDTD 計算の 結果と良く一致した。



図 5.18: WGM の共振波長 λ と共振器半径 R の関係図

第6章 GaAs/AlO_xの選択ドライエッチ ングによる円形欠陥共振器アレイにお ける電流分離溝の作製

6.1 緒言

第2章で述べたように、共振器間の電気クロストークを防ぐために CirD レーザアレ イに電流分離溝 (Current Blocking Trench: CBT) を作製することが必須である。GaAs コ ア層に電流を注入するために、上下クラッド層の共振器中心部分は AlGaAs のまま保ち、 共振器中心部分以外の AlGaAs を絶縁体の AlO_x に酸化させている。よって、図 6.1 に 示すように、CirD レーザの上部の p-GaAs コンタクト層をドライエッチングで除去し、 CBT を作製すれば、CirD レーザアレイ内の隣接する共振器は互いに電気的に絶縁され る。しかし、CBT が光導波路と交差しているため、上部の p-GaAs コンタクト層をエッ チングで除去する際に、下の AlO_x クラッド層もエッチングされると、光が散乱され、 大きな光損失が出る恐れがある。以上のことから、GaAs/AlO_xに対して高い選択性のあ るドライエッチング技術が必須である。

1989 年に Nakao らは AlO_xをハードマスクとして利用し、GaAs をエッチングしフォ トニック結晶構造を作製した[115]。彼らは、Br₂-N₂ガスシステムを使用した反応性ビー ムエッチング (Reactive beam etching) により、GaAs と AlO_xの間で約5 という比較的低 いエッチング選択比を得た。また、Cheng らは、GaAs と AlO_xに対して 30 のエッチン グ選択比が得られたと報告したが、使用したエッチングガスについては論文に記載され ていない[116]。一方、2004 年に Kim らは Cl₂/BCl₃/Ar の混合ガスを使用して、AlO_xに関 する誘導結合プラズマ (inductively coupled plasma: ICP) ドライエッチングの研究を行っ た[117]。彼らの報告によると、Cl₂/BCl₃/Ar の混合ガスにおける BCl₃の比率は、AlO_xに 対するエッチングレートに大きな影響を与える。BCl₃の比率が 0% から 10%までに増 加したとき AlO_xのエッチングレートが大幅に増加したが、10%を超えると AlO_xのエッ チングレートが急速に下がった。この現象が起こる理由は、エッチングされた AlO_x 層 の表面に非揮発性の BO_xが形成されることにより、揮発性の AlCl_x及び BOCl_xの形成や スパッタリングが阻止されるためであると考えられる[117]。よって、ドライエッチング に適切な BCl₃比率の Cl₂/BCl₃ 混合ガスを使用すると、GaAs/AlO_xに対して高い選択性を 実現できる可能性がある。そして、Cl₂/BCl₃ 混合ガスで AlO_x をエッチングする際に、 AlO_x 層の表面に生成された BO_x は絶縁であるため、Cl₂/BCl₃ 混合ガスによるドライエッ チングは、CirD レーザアレイで絶縁性の CBT を作製するための有望な解決策である。



図 6.1: CirD レーザアレイにおける CBT の概略図

そこで本章では、CirD レーザアレイ上に CBT を作製するために、Kim ら[117]と類似 する Cl₂/BCl₃/CH₄の混合ガスを利用した ICP ドライエッチングによる GaAs/AlO_x 選択エ ッチングを紹介する。フォトニック結晶構造を形成する空孔の存在がエッチングに影響 すると考えられるため、選択エッチングは、フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x ヘテロ層とフォトニック結晶構造のない平坦な GaAs/AlO_x ヘテロ層について実施した。 選択エッチングの結果は SEM で観察することにより評価した。さらに、得られた結果 に基づいて、円形欠陥共振器アレイ上に CBT を作製し、また、隣接する共振器間の電 気抵抗を測定し、CBT の電気絶縁効果を調べた。

6.2 平坦な GaAs/AlOx ヘテロ層のエッチング

本節では、平坦な GaAs/AlO_x ヘテロ層において選択エッチングを行った結果について 述べる。

6.2.1 実験手順

選択ドライエッチングの実験手順を図 6.2 にまとめる。本章で使用したヘテロ基板の 構成を図 6.2 (a) に示す。この基板は分子線エピタキシー法 (Molecular Beam Epitaxy: MBE) によってn-GaAsの基板に成長したものである。GaAs コア層は2つのAl_{0.95}Ga_{0.05}As クラッド層によって挟まれている。GaAs コア層の中にレーザ発振に光学利得を提供す る5層の InAs QD 層を含んでいる。そして、基板の最上部に p-GaAs コンタクト層があ る。コア層、クラッド層、及びコンタクト層の厚みは、それぞれ 330、255、及び 110 nm である。以下に、各工程の詳細について述べる。

a) EB リソグラフィー

先ず、基板をエタノールで超音波洗浄し、基板表面に付着しているゴミや有機物の汚れを除去した。その後、スピンコートによりポジ型レジスト (ZEP520A:日本ゼオン社製) を塗布した。スピンコート後は、180℃のホットプレートにより、180秒間のプリベー クを行った。次に、EBリソグラフィーによりラインパターンを描画した。その後、24℃ の恒温槽で 90 秒間の現像(ZED-N50: 日本ゼオン社製) とリンス (ZMD-B: 日本ゼオン 社製)を行った。

b) ICP 深堀りエッチング

次に、描画したマーカーとラインパターンを有するレジストをマスクとして、ICP に よるドライエッチングを行い、基板においてマーカーと深い溝を作製した。塩素系のガ スで InAs をエッチングする際に、揮発性の低い InCl₃が生成されるため[104]、InAs ド ット層を含む GaAs コア層をエッチングする条件は、p-GaAs コンタクト層と AlGaAs ク ラッド層の条件とは異なる。よって、この工程では、表 6.1 に示すように三つのステッ プに分けてエッチングを実施した。エッチング後は、試料をリムーバーとエタノールで 超音波洗浄し、レジストの除去を行った。

c) 水蒸気酸化

エッチング後の試料を酸化炉に入れ、作製した深い溝を通して H_2O/N_2 雰囲気で加熱 することにより、AlGaAs を AlO_xに酸化させる。酸化の際の窒素流量、酸化温度、及び 酸化時間は、それぞれ、1.0 L/min、390°C、及び 60 分に設定した。この条件では、深い 溝の両辺にある幅約 2.6 μ m の AlGaAs が AlO_xに酸化された。

d) CBT の重ね描画

続いて、上記 a) のプロセスと同様に酸化後の試料にレジストを塗布し、プリベーク した。前述のマーカーを用いて位置合わせすることにより CBT の重ね描画を実施した。 深い溝の間に線幅約 0.5 μm の CBT パターンを描画した。

e) 選択エッチング

最後に、描画した CBT パターンを有するレジストマスクを用いて、選択ドライエッ

チングを行った。エッチング条件を表 6.2 に示す。ガス全流量に対する BCl₃の比率が約 54.5%である。エッチング後、試料をリムーバーとエタノールで超音波洗浄し、レジストの除去を行った。



(e) ICP selective dry etching

図 6.2: 平坦な GaAs/AlOx ヘテロ層の選択ドライエッチング実験手順

	Step 1	Step 2	Step 3
Cl ₂ 流量 (sccm)	12.0	12.0	12.0
BCl ₃ 流量 (sccm)	18.0	18.0	18.0
CH4 流量 (sccm)	3.0	1.0	3.0
アンテナ電力 (W)	300	300	300
バイアス電力 (W)	23	23	23
プロセス圧 (Pa)	0.60	0.60	0.60
PFC Press (Pa)	300	300	300
チラー温度 (°C)	20	20	20
エッチング時間 (s)	65	50	50

表 6.1: 多層ヘテロ基板の深堀りの条件

表 6.2: CBT の選択ドライエッチングの条件

Cl ₂ 流量 (sccm)	12.0
BCl ₃ 流量 (sccm)	18.0
CH4 流量 (sccm)	3.0
アンテナ電力 (W)	300
バイアス電力 (W)	23
プロセス圧 (Pa)	0.60
PFC Press (Pa)	300
チラー温度 (°C)	20

6.2.2 結果及び考察

平坦な GaAs/AlO_x ヘテロ層に対して、エッチングの時間を 5 秒から 120 秒まで変え て、CBT の選択ドライエッチングを行った。図 6.3 (a) ~ (c) にそれぞれ 5 秒、15 秒、 25 秒間エッチングした後の CBT の SEM 俯瞰図を示す。エッチング時間が 5 秒のとき CBT 内の p-GaAs コンタクト層が殆どエッチングされてないが、15 秒のとき p-GaAs コ ンタクト層の大部分がエッチングされており、CBT の底が凸凹している。エッチング時間をさらに 25 秒までに増加させると、CBT が AlO_x層に到達し、CBT の底が平坦となった。この後、エッチング時間を 120 秒までに増加しても、AlO_x層に対するエッチングが観察されなかった。これらの結果によって、表 6.2 に示すレシピが AlO_xに対するエッチングレートがほぼ 0 nm/min と言える。一方、このレシピを用いて酸化処理を施さない元のヘテロ基板をエッチングした際、図 6.4 に示すように、120s でコア層を貫通し、n-AlGaAs 層まで到達した。以上のことから、表 6.2 に示すレシピは GaAs/AlO_xに対して極めて高い選択性が有すると判った。



図 6.3: 平坦な GaAs/AlO_x ヘテロ層を異なる時間でエッチングした CBT の俯瞰 SEM 図: (a) 5 秒、 (b) 15 秒、 (c) 25 秒



図 6.4: 元のヘテロ基板を 120 s でエッチングした CBT の SEM 断面図

6.3 フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlOx ヘテ

ロ層へのエッチング

本節では、フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x ヘテロ層において選択エッチングを行い、その結果について述べる。

6.3.1 実験手順

実験手順を図 6.5 にまとめる。作製条件は 6.2 節と基本的に同じであるが、一回目の EB リソグラフィーにおいては、深い溝を作製するためのラインパターンの代わりに、 フォトニック結晶パターンを描画した。



(e) ICP selective dry etching

図 6.5: フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlOx ヘテロ層の選択ドライエッチング実験手 順

1

結果及び考察 6.3.2

フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlOx ヘテロ層に対して、エッチングの時間を20

秒から 120 秒まで変えて、CBT の選択ドライエッチングを行った。図 6.6(a) はエッチ ング時間が 40 秒のとき、試料の俯瞰図を示している。エッチング時間を 40 秒に増やし たが、CBT の底は不均一だった。 空孔周囲の p-GaAs のエッチング速度は、空孔間の p-GaAs のエッチング速度より明らかに遅い。その原因は、空孔の存在によって、ドラ イエッチング過程における圧力とエッチャント濃度が空間的に異なっているからだと 考えられる。

エッチング深さを評価するために、図 6.6 (b) に示すように、2 つのパラメータ d_{max} と d_{min} を定義し、それぞれ CBT 内一番深いところと浅いところの深さを意味する。図 6.6 (c) に、エッチング時間と d_{max}及び d_{min}の関係を示す。比較のために、同じレシピを 用いて元のヘテロ基板をエッチングした。図 6.6 (c) の破線は元のヘテロ基板をエッチ ングする際の時間とエッチング深さの関係を表す。d_{max}は 20 秒で 104 nm になり、AlO_x 層に達していると考えられる。そして、エッチング時間が 20 秒から 120 秒までの時間 帯では、d_{max}はほぼ一定の値となり、飽和する傾向を示す。一方、d_{min}は、最初の 60 秒 間に 25nm 以下の低い値であり、80 秒のとき約 80nm に達した。そして、80 秒から 120 秒までの時間帯では、d_{min}は d_{max} と同じように飽和する傾向を示す。d_{min}の飽和現象は、 AlO_x層でエッチングが停止したことを意味する。以上のことから、表 6.2 の条件を利用 することで、フォトニック結晶構造を GaAs/AlO_x ヘテロ層において、CBT を作製できる ことが分かった。



図 6.6: (a) フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x ヘテロ層を 40 秒間エッチングした CBT の俯瞰図、 (b) 断面図 (*d*_{max}: CBT 内一番深いところの深さ、*d*_{min}: CBT 内一浅いところ の深さ)、 (c) エッチング時間と *d*_{max}及び *d*_{min}の関係 (破線: 元のヘテロ基板をエッチング する際の時間とエッチング深さの関係)

飽和状態における d_{max} と d_{min}の差は約 30 nm であり、AlO_x 層の表面に堆積物がある ことを意味する。堆積物が生成された理由として、2つの可能性が考えられる。一つは、 AlO_x層の上にある p-GaAs 層が完全に除去されず、GaAs が残留している可能性である。 もう一つは、AIO_x層の表面にエッチング過程中に生成された反応物が堆積されている 可能性である。図 6.7 (a) と (b) は、それぞれ 40 秒と 120 秒間エッチングした試料の 上面図を示している。40秒間エッチングした試料の俯瞰図及び断面図は図 6.6 に示し ている。図 6.7(a) に示すように、40秒のとき、空孔周囲の円周状の領域は、空孔間の 領域よりも明らかに明るくなっている。GaAs と AlOrの導電率の違いにより、SEM で は GaAs が AlOr より明るく観察されるので、空孔周囲の円周状に堆積されている物質 が GaAs であると考えるのは妥当である。また、図 6.7 (b) に示すように、120 秒のと き、上面から観察した CBT 内部の明るさは均一であった。もし、120 秒のとき、空孔周 囲に GaAs が残留しているとすれば、GaAs と AlO_xの導電率の違いにより、図 6.7 (b) の空孔周囲の円周状の領域は、図 6.7(a)と同様に、空孔間の領域よりも明るく観察され るべきである。従って、図 6.7 (b)に示す CBT 内に p-GaAs が残っていないと考えられ る。以上のことから、dmaxとdminの違いは、AlOxと同じように絶縁性の反応生成物の堆 積が原因であると推測するのが妥当である。一方、反応生成物は、空孔周囲の p-GaAs のエッチング速度が低下したため、空孔周囲に主に堆積したと考えられる。BCl₃の比率 が54.5%と高いため、反応生成物はBOxである可能性がある。



図 6.7: (a) フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x ヘテロ層を 40 秒間エッチングした CBT の上面図、 (b) フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x ヘテロ層を 120 秒間エッチ ングした CBT の上面図

6.4 電流分離溝の電流分離効果

前節では、Cl₂/BCl₃/CH₄の混合ガスを用いて、フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x ヘテロ層において CBT の作製ができたので、本節では、その結果を参考に CBT を有する円形欠陥共振器アレイを作製した。共振器アレイは図 6.8 に示すように 設計した。そして、CBT の電流分離効果を共振器間の電気抵抗を測定することにより調 べた。ここでは、p-GaAs コンタクト層における電気抵抗を測定する際に、電流が AlGaAs ファネルを通して隣接共振器へ流れることを防ぐために、共振器の中心部分にある AlGaAs も AlO_xに酸化させた。



図 6.8: 円形欠陥共振器アレイの概略図

6.4.1 作製手順

図 6.9 に実験の流れを示し、以下に各工程の詳細について説明する。

a) レジスト塗布・EB リソグラフィー

先ず、6.2節と同一の手順と条件で基板の上にレジストを塗布した。そして、EBリソ グラフィーにより、重ね描画用のマーカーと円形欠陥共振器アレイのパターンを描画し た。格子定数 *a*、空孔半径 *r* がそれぞれ 340 nm と 105 nm に設計した。本節では、光学 測定を行わないため、アレイにおけるすべての共振器の半径 *R* を 2.77 *a* に設計した。ま た、第2章では、CirD レーザアレイにおける共振器間隔を 5 μm に想定したが、今回は 重ね描画精度を考慮し、余裕を持って 10 μm に設計した。

b) 深堀りエッチングと水蒸気酸化

空孔のエッチングと AlGaAs の酸化工程は 6.2 節と同一の条件で行った。6.2 節の酸化 工程では酸化幅が約 2.6 μm であるので、共振器中心部分の AlGaAs も AlO_xに酸化され ている。

c) CBT の重ね描画

酸化工程の後、作製したマーカーを用いて位置合わせすることにより、共振器の周辺 に CBT パターンを描画した。CirD レーザアレイの集積度を高めるために、CBT 幅を最 適化する必要がある。本節では 0.2 から 1 µm まで、0.2 µm 間隔で 5 つの幅を持つ CBT パターンを描画した。

d) CBT の選択エッチング

前節において、エッチングは80秒で飽和したが、本節ではp-GaAs コンタクト層を完 全に除去するために、より長い120秒でCBTを選択エッチングした。エッチング後、 試料をリムーバーとエタノールで超音波洗浄し、レジストの除去を行った。

e) 電極の重ね描画

CBT 作製後、再びマーカーを利用する重ね描画を行い、共振器アレイの上に電極パタ ーンを描画した。第2章では、CirD レーザアレイにおける電極サイズとして、共振器の 上では 2×2 μm²、ボンディング用の領域では、5×5 μm²と想定したが、ここでは、次の 抵抗測定を行うため、余裕を持って共振器の上では 5×5 μm²、ボンディング用の領域で は 100× 100 μm²の電極を描画した。

f) 電極の斜め蒸着

電極パターンを有するレジストマスクを形成した後、真空蒸着法により Cr と Au を

共振器アレイの上に順次蒸着した。Cr と Au を膜厚はそれぞれ 5 nm、150 nm に設定した。Cr と Au などの金属粒子が光を吸収するため、空孔を通してコア層とクラッド層までに侵入すると、レーザの特性に大きな影響を与える恐れがある。よって、ここでは基板を 60°傾けて斜め蒸着を実施した。この条件では空孔内の金属の粒子の侵入が p-GaAs コンタクト層までに抑えられる。電極蒸着後、試料をリムーバーに浸し、超音波をかけることによりレジストを除去し、リフトオフした。

g) アニール

Cr/Au 電極蒸着後、p-GaAs コンタクト層とオーミックコンタクトを形成するために、 アニールを行った。アニール温度と時間はそれぞれ 400°C、60 秒と設定した。この条件 では、Cr/Au 電極と p-GaAs コンタクト層の固有接触抵抗が最小となり、約7.8×10⁻⁶Ω·cm² である。



図 6.9: CBT 電流分離効果を評価する試料の作製工程の模式図

6.4.2 電気抵抗測定方法

2つのパッド電極にプローブを接触させ、マルチメータの2端子抵抗測定機能を用いて共振器間の抵抗を測定した。マルチメータには HEWLETT PACKARD 社製

34401AMULTIMETER を使用した。

6.4.3 結果及び考察

本節では、CBT の幅の電流分離効果への影響を調べるために、円形欠陥共振器アレイ において、0.2 µm 間隔で幅を0.2 から1 µm に変更し CBT を作製した。図 6.10 には、 異なる幅で作製した CBT の上面 SEM 図を示している。上面 SEM 図から観察すると、 CBT の底が平坦であることが判る。また、比較するために、CBT なし (幅が 0 µm) の 円形欠陥共振器アレイも作製した。



図 6.10: 異なる幅で作製した CBT の上面 SEM 図: (a) 0.2 µm、(b) 0.4 µm、(c) 0.6 µm、(d) 0.8 µm、(e) 1.0 µm





図 6.11: 作製した円形欠陥共振器アレイの SEM 図: (a)上面図、(b) 電極部分の断面図

図 6.11 (a) に作製した円形欠陥共振器アレイの上面 SEM 図を示す。これより、共振器アレイにおいて CBT と Cr/Au 電極が精度良く作製できていることが判る。図 6.11 (b)

に円形欠陥共振器アレイの断面 SEM を示す。これより、空孔の p-GaAs コンタクト層の部分のみに、Cr/Au が付着しているが、クラッド層とコア層内へは侵入していないことが確認できた。

表 6.3 に異なる幅の CBT を持つ円形欠陥共振器アレイにおいて、共振器間の抵抗を 測定した結果をまとめる。ここで、全ての幅の CBT を持つ円形欠陥共振器アレイを三 つ同時に作製し、測定した結果を示す。CBT なしの場合、抵抗は約 200 Ω であり、CirD レーザの垂直方向の微分抵抗は約 1k Ω であることをふまえると、CBT が必須であるこ とが判る。CBT 幅が 0.2 µm の場合、抵抗は 2.9 k Ω から 100 M Ω までの範囲で変動して いた。これは、120 秒間エッチングしても、幅 0.2 µm の CBT の中に p-GaAs が残留す る可能性があると意味する。6.3 節で述べたように、空孔の存在がエッチングに大きく 影響するので、幅が空孔の直径と同等な CBT においては p-GaAs を完全に除去すること が困難であると考えられる。従って、残留した p-GaAs によって形成された電流経路が、 幅 0.2 µm の CBT 中に形成されている可能性がある。一方、幅が 0.4 µm 以上の CBT を 有する場合、すべての試料における抵抗は装置測定限界の 100 M Ω に達した。これより、 CirD レーザアレイにおいて、幅が 0.4 µm 以上の CBT を作製すれば、各レーザが電気 クロストークなしで独立して動作できる。CirD レーザアレイにおける共振器間隔を今 後 5 µm に縮小する場合でも、幅が 0.4 µm の CBT は余裕を持って作製できる。
表 6.3: 異なる幅の CBT を持つ円形欠陥共振器アレイにおける隣接する共振器間の電気抵抗 (OVL: 測定限界である 100 MΩ)

CBT width	Sample 1	Sample 2	Sample 3
(µm)	(Ω)	(Ω)	(Ω)
0	248	200	184
0.2	8090	2960	OVL
0.4	OVL	OVL	OVL
0.6	OVL	OVL	OVL
0.8	OVL	OVL	OVL
1.0	OVL	OVL	OVL

第7章 結論

本論文では、チップ内 WDM の実現に向けて、CirD レーザの有望性を理論及び実験の両方から検討した。

第2章では、CirDレーザの特徴及びCirDレーザアレイの構成について詳しく述べた。 CirDレーザは円形欠陥共振器と AlGaAs/AlOx クラッド層を利用することにより、電気 抵抗、熱抵抗また機械安定性などの点において従来の空気クラッド層フォトニック結晶 レーザより性能が優れると期待できる。また、円形欠陥共振器の波長は共振器半径を変 えることにより制御できるため、複数の半径の異なる円形欠陥共振器を同一の導波路の 両辺に設置すれば、オンチップ波長多重通信が期待できる。また、同じ特徴を利用して、 同一の基板上に CirD-PD アレイを構成すれば、非常にコンパクトな光送受信器が期待 できる。

第3章では、レート方程式とFDTD 法を用いて CirD レーザの特性を理論的に解析した。レート方程式の結果によると、CirD レーザの Q 値が 2000 以上にあれば、10 µA 以下の低閾値電流で動作できる可能性があることがわかった。また、注入電流が 400 µA の場合、CirD レーザの緩和振動周波数が 39.5 GHz に達するため、50 Gbps の変調速度が期待できる。一方、FDTD 法の解析によると、WGM の共振波長は共振器半径 R に正比例することが判明した。つぎに、円形欠陥共振器の各パラメータが WGM に与える影響を定性的・定量的に分析することにより、円形欠陥共振器を設計する方針を得た。また、WGM の Q 値を改善する新構造を提案した。新構造では、円形欠陥共振器を形成する空孔の位置の最適化により、WGM の共振波長を維持したままで、20 nm 以上の帯域幅で 5000 以上の Q 値を実現できる。最後に、円形欠陥共振器と W1 導波路の結合について調べた。W1 導波路の導波路幅を狭めることにより、円形欠陥共振器との結合を制御できる。目標の結合効率 η を 0.2 に設定すれば、約 10 nm の帯域幅が実現可能と期待される。

第4章では、CirD レーザ作製に重要な EB リソグラフィーとドライエッチング技術について説明した。特に、高精度の EB リソグラフィーを実現する方法について述べた。

第5章では、光励起を用いて2種類のクラッド層を持つ円形欠陥共振器の特性につい て調べた。空孔/AlO_xクラッド層構造では、25 µW の低閾値でのレーザ動作に成功した。 WGM の線幅が装置分解能の 0.07 nm に達し、50 nm の波長範囲で約 20 dB の SMSR が 得られた。次に、2.75 ~ 2.81 a の範囲で共振器半径 R を変えることにより、20 nm 以上 の WGM の共振波長制御が実現できた。しかし、xz 面における 2 次元光分布を測定した 結果、断面における WGM の出射位置が導波路端とは異なることが示唆されたことか ら、円形欠陥共振の WGM と W1 導波路モードの結合が弱いことも判明した。一方、二 層 AlO_x クラッド層構造では、約 50 µW の低閾値でのレーザ動作に成功した。そして、 WGM の線幅が装置分解能の 0.07 nm に達し、50 nm の波長範囲で約 28 dB の SMSR が 得られた。次に、2.75 ~ 2.81 a の範囲で共振器半径 R を変えることにより、20 nm 以上 の WGM の共振波長制御が実現でき、WGM の共振波長と R との線形関係を実証した。 これによって、CirD レーザを用いてチップ内 WDM を実現可能であることを実証した。

第6章では、CirD レーザアレイにおける各共振器を独立に動作させるために必要な CBT を作製する GaAs/AlO_x選択エッチング技術を確立した。Cl₂/BCl₃/CH₄の混合ガスを 使用したレシピは、GaAs に対して高いエッチングレートを示し、AlO_xに対するエッチ ングレートが殆ど0であることから、AlO_xに対する GaAs エッチング選択性が非常に高 いことが判明した。このレシピを用いて、フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x へ テロ層において、CBT を作製できた。一方、空孔周辺の p-GaAs のエッチング速度は、 空孔間の p-GaAs のエッチング速度よりも遅いことがわかった。そして、円形欠陥共振 器アレイにおいて幅の異なる CBT を作製し、幅が 0.4 μm 以上の CBT において電流分 離効果を実証した。これによって CirD レーザアレイにおける複数の共振器を独立に変 調可能であることが期待できる。

106

参考文献

- P. Kapur, J. P. McVittie, and K. C. Saraswat. Technology and reliability constrained future copper interconnects. I. Resistance modeling. *IEEE Trans. Electron Devices* 49(4), 590 (2002).
- [2] P. Kapur, G. Chandra, J. P. McVittie, and K. C. Saraswat. Technology and reliability constrained future copper interconnects. II. Performance implications. *IEEE Trans. Electron Devices* 49(4), 598 (2002).
- [3] D. Miller. Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips. *Proc. IEEE* 97(7), 1166 (2009).
- [4] I. A. Young, E. Mohammed, J. T. S. Liao, A. M. Kern, S. Palermo, *et al.* Optical I/O Technology for Tera-Scale Computing. *IEEE J. Solid-State Circuits* 45(1), 235 (2010).
- [5] Y. Arakawa, T. Nakamura, Y. Urino, and T. Fujita. Silicon photonics for next generation system integration platform. *IEEE Commun. Mag.* 51(3), 72 (2013).
- [6] Y. Xiong, H. Ye, T. Umeda, S. Mizoguchi, M. Morifuji, *et al.* Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser. *Photonics* 6(2), 54 (2019).
- [7] D. Inoue, J. Lee, T. Hiratani, Y. Atsuji, T. Amemiya, *et al.* Sub-milliampere threshold operation of butt-jointed built-in membrane DFB laser bonded on Si substrate. *Opt. Express* 23(6), 7771 (2015).
- [8] D. Inoue, T. Hiratani, K. Fukuda, T. Tomiyasu, T. Amemiya, *et al.* Low-bias current 10 Gbit/s direct modulation of GaInAsP/InP membrane DFB laser on silicon. *Opt. Express* 24(16), 18571 (2016).
- [9] D. Inoue, T. Hiratani, K. Fukuda, T. Tomiyasu, Z. Gu, *et al.* Integrated Optical Link on Si Substrate Using Membrane Distributed-Feedback Laser and p-i-n Photodiode. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 23(6), (2017).
- [10] A. J. Zilkie, P. Seddighian, B. J. Bijlani, W. Qian, D. C. Lee, *et al.* Power-efficient III-V/Silicon external cavity DBR lasers. *Opt. Express* 20(21), 23456 (2012).
- [11] R. Michalzik, K. J. Ebeling, M. Kicherer, F. Mederer, R. King, *et al.* High-performance VCSELs for optical data links. *IEICE Trans. Commun.* E85-B(5), 1255 (2001).
- [12] D. M. Kuchta, Y. H. Kwark, C. Schuster, C. Baks, C. Haymes, *et al.* 120-Gb/s VCSEL-based parallel-optical interconnect and custom 120-Gb/s testing station. *J. Light. Technol.* 22(9),

2200 (2004).

- [13] M. Feng, C.-H. Wu, and N. Holonyak. Oxide-Confined VCSELs for High-Speed Optical Interconnects. *IEEE J. Quantum Electron.* 54(3), 1 (2018).
- [14] B. Ciftcioglu, R. Berman, J. Zhang, Z. Darling, S. Wang, et al. A 3-D integrated intrachip free-space optical interconnect for many-core chips. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 23(3), 164 (2011).
- [15] B. Ciftcioglu, R. Berman, S. Wang, J. Hu, I. Savidis, *et al.* 3-D integrated heterogeneous intra-chip free-space optical interconnect. *Opt. Express* 20(4), 4331 (2012).
- [16] P.-K. Shen, C.-T. Chen, R.-H. Chen, S.-S. Lin, C.-C. Chang, *et al.* Chip-Level Optical Interconnects Using Polymer Waveguide Integrated With Laser/PD on Silicon. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 27(13), 1359 (2015).
- [17] J. Ferrara, W. Yang, L. Zhu, P. Qiao, and C. J. Chang-Hasnain. Heterogeneously integrated long-wavelength VCSEL using silicon high contrast grating on an SOI substrate. *Opt. Express* 23(3), 2512 (2015).
- [18] M. Fujita, A. Sakai, and T. Baba. Ultrasmall and ultralow threshold GaInAsP-InP microdisk injection lasers: design, fabrication, lasing characteristics, and spontaneous emission factor. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 5(3), 673 (1999).
- [19] P. Rojo Romeo, J. Van Campenhout, P. Regreny, A. Kazmierczak, C. Seassal, *et al.* Heterogeneous integration of electrically driven microdisk based laser sources for optical interconnects and photonic ICs. *Opt. Express* 14(9), 3864 (2006).
- [20] D. Van Thourhout, T. Spuesens, S. K. Selvaraja, L. Liu, G. Roelkens, *et al.* Nanophotonic devices for optical interconnect. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 16(5), 1363 (2010).
- [21] R. Kumar, T. Spuesens, P. Mechet, N. Olivier, J.-M. Fedeli, *et al.* 10Gbit/s all-optical NRZ-OOK to RZ-OOK format conversion in an ultra-small III-V-on-silicon microdisk fabricated in a CMOS pilot line. *Opt. Express* 19(24), 24647 (2011).
- [22] P. Mechet, F. Raineri, A. Bazin, Y. Halioua, T. Spuesens, *et al.* Uniformity of the lasing wavelength of heterogeneously integrated InP microdisk lasers on SOI. *Opt. Express* 21(9), 10622 (2013).
- [23] Y.-D. Yang, Y. Zhang, Y.-Z. Huang, and A. W. Poon. Direct-modulated waveguide-coupled microspiral disk lasers with spatially selective injection for on-chip optical interconnects. *Opt. Express* 22(1), 824 (2014).

- [24] G. Morthier, T. Spuesens, P. Mechet, G. Roelkens, and D. Van Thourhout. InP microdisk lasers integrated on Si for optical interconnects. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 21(6), (2015).
- [25] D. Liang, M. Fiorentino, T. Okumura, H.-H. Chang, D. T. Spencer, *et al.* Electricallypumped compact hybrid silicon microring lasers for optical interconnects. *Opt. Express* 17(22), 20355 (2009).
- [26] Y. Akahane, T. Asano, B.-S. Song, and S. Noda. High-Q photonic nanocavity in a twodimensional photonic crystal. *Nature* 425(6961), 944 (2003).
- [27] M. Nomura, S. Iwamoto, K. Watanabe, N. Kumagai, Y. Nakata, *et al.* Room temperature continuous-wave lasing in photonic crystal nanocavity. *Opt. Express* 14(13), 6308 (2006).
- [28] K. Nozaki, S. Kita, and T. Baba. Room temperature continuous wave operation and controlled spontaneous emission in ultrasmall photonic crystal nanolaser. *Opt. Express* 15(12), 7506 (2007).
- [29] M. Nomura, S. Iwamoto, N. Kumagai, and Y. Arakawa. Temporal coherence of a photonic crystal nanocavity laser with high spontaneous emission coupling factor. *Phys. Rev. B* 75(19), 195313 (2007).
- [30] E. Yablonovitch. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Phys. Rev. Lett.* 58(20), 2059 (1987).
- [31] S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.* 58(23), 2486 (1987).
- [32] S. Y. Lin, J. G. Fleming, D. L. Hetherington, B. K. Smith, R. Biswas, *et al.* A threedimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths. *Nature* **394**(6690), 251 (1998).
- [33] H. B. Sun, S. Matsuo, and H. Misawa. Three-dimensional photonic crystal structures achieved with two-photon-absorption photopolymerization of resin. *Appl. Phys. Lett.* 74(6), 786 (1999).
- [34] S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto, and A. Chutinan. Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths. *Science* (80-.). 289(5479), 604 (2000).
- [35] M. Okano, A. Chutinan, and S. Noda. Analysis and design of single-defect cavities in a threedimensional photonic crystal. *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 66(16), 1 (2002).
- [36] S. Matsuo, T. Sato, K. Takeda, A. Shinya, K. Nozaki, et al. Ultralow Operating Energy

Electrically Driven Photonic Crystal Lasers. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19**(4), 4900311 (2013).

- [37] K. Takeda, T. Sato, A. Shinya, K. Nozaki, W. Kobayashi, *et al.* Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers. *Nat. Photonics* 7(7), 569 (2013).
- [38] S. Matsuo, T. Sato, K. Takeda, A. Shinya, K. Nozaki, *et al.* Photonic crystal lasers using wavelength-scale embedded active region. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 47(2), 023001 (2014).
- [39] K. Takeda, T. Sato, T. Fujii, E. Kuramochi, M. Notomi, *et al.* Heterogeneously integrated photonic-crystal lasers on silicon for on/off chip optical interconnects. *Opt. Express* 23(2), 702 (2015).
- [40] S. Matsuo, and K. Takeda. λ-scale embedded active region photonic crystal (LEAP) lasers for optical interconnects. *Photonics* 6(3), (2019).
- [41] N. Skivesen, A. Têtu, M. Kristensen, J. Kjems, L. H. Frandsen, *et al.* Photonic-crystal waveguide biosensor. *Opt. Express* 15(6), 3169 (2007).
- [42] L. L. Chan, M. Pineda, J. T. Heeres, P. J. Hergenrother, and B. T. Cunningham. A General Method for Discovering Inhibitors of Protein–DNA Interactions Using Photonic Crystal Biosensors. ACS Chem. Biol. 3(7), 437 (2008).
- [43] M. El Beheiry, V. Liu, S. Fan, and O. Levi. Sensitivity enhancement in photonic crystal slab biosensors. *Opt. Express* 18(22), 22702 (2010).
- [44] D. Threm, Y. Nazirizadeh, and M. Gerken. Photonic crystal biosensors towards on-chip integration. J. Biophotonics 5(8–9), 601 (2012).
- [45] G. Michael. Photonic crystal defect cavity biosensor. United States patent US 6,990,259 B2, (2006).
- [46] T. Baba. Biosensing using photonic crystal nanolasers. MRS Commun. 5(4), 555 (2015).
- [47] S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada, A. Chutinan, and M. Mochizuki. Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design. *Science (80-.).* 293(5532), 1123 (2001).
- [48] K. Hirose, Y. Liang, Y. Kurosaka, A. Watanabe, T. Sugiyama, *et al.* Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers. *Nat. Photonics* 8(5), 406 (2014).
- [49] M. Qiu. Band gap effects in asymmetric photonic crystal slabs. *Phys. Rev. B* **66**(3), 033103 (2002).

- [50] J.-M. Lourtioz, H. Benisty, V. Berger, J.-M. Gerard, D. Maystre, et al. Photonic Crystals. (Springer Berlin Heidelberg, 2008).
- [51] M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, T. Tokuda, M. Murata, *et al.* Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure. *Appl. Phys. Lett.* **75**(3), 316 (1999).
- [52] K. Kitamura, T. Okino, D. Yasuda, and S. Noda. Polarization control by modulated photoniccrystal lasers. *Opt. Lett.* 44(19), 4718 (2019).
- [53] S. Noda, M. Fujita, and T. Asano. Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities. *Nat. Photonics* **1**(8), 449 (2007).
- [54] O. Painter. Two-Dimensional Photonic Band-Gap Defect Mode Laser. Science (80-.).
 284(5421), 1819 (1999).
- [55] H. G. Park, S. H. Kim, S. H. Kwon, Y. G. Ju, J. K. Yang, *et al.* Electrically driven singlecell photonic crystal laser. *Science* (80-.). **305**(5689), 1444 (2004).
- [56] G. Crosnier, D. Sanchez, S. Bouchoule, P. Monnier, G. Beaudoin, *et al.* Hybrid indium phosphide-on-silicon nanolaser diode. *Nat. Photonics* 11(5), 297 (2017).
- [57] M. Morifuji, Y. Nakaya, T. Mitamura, and M. Kondow. Novel Design of Current Driven Photonic Crystal Laser Diode. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 21(8), 513 (2009).
- [58] H.-Y. Ryu, M. Notomi, G.-H. Kim, and Y.-H. Lee. High quality-factor whispering-gallery mode in the photonic crystal hexagonal disk cavity. *Opt. Express* **12**(8), 1708 (2004).
- [59] G. Roelkens, L. Liu, D. Liang, R. Jones, A. Fang, *et al.* III-V/silicon photonics for on-chip and intra-chip optical interconnects. *Laser Photonics Rev.* 4(6), 751 (2010).
- [60] M. J. R. Heck, H. W. Chen, A. W. Fang, B. R. Koch, D. Liang, *et al.* Hybrid silicon photonics for optical interconnects. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 17(2), 333 (2011).
- [61] M. J. R. Heck, and J. E. Bowers. Energy efficient and energy proportional optical interconnects for multi-core processors: Driving the need for on-chip sources. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 20(4), (2014).
- [62] J. E. Bowers, T. Komljenovic, M. Davenport, J. Hulme, A. Y. Liu, *et al.* Recent advances in silicon photonic integrated circuits. *Next-Generation Opt. Commun. Components, Sub-Systems, Syst. V* 9774 977402 (2016).
- [63] Y. Urino, T. Usuki, J. Fujikata, M. Ishizaka, K. Yamada, *et al.* High-density and widebandwidth optical interconnects with silicon optical interposers [Invited]. *Photonics Res.*

2(3), A1 (2014).

- [64] Y. A. Vlasov, and S. J. McNab. Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends. *Opt. Express* 12(8), 1622 (2004).
- [65] T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. I. Takahashi, *et al.* Microphotonics devices based on silicon microfabrication technology. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 11(1), 232 (2005).
- [66] W. Bogaerts, S. K. Selvaraja, P. Dumon, J. Brouckaert, K. De Vos, *et al.* Silicon-on-insulator spectral filters fabricated with CMOS technology. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 16(1), 33 (2010).
- [67] G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson. Silicon optical modulators. *Nat. Photonics* 4(8), 518 (2010).
- [68] D. J. Thomson, F. Y. Gardes, J. M. Fedeli, S. Zlatanovic, Y. Hu, et al. 50-Gb/s silicon optical modulator. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 24(4), 234 (2012).
- [69] G. Masini, L. Colace, and G. Assanto. 2.5 Gbit/s polycrystalline germanium-on-silicon photodetector operating from 1.3 to 1.55 μm. *Appl. Phys. Lett.* 82(15), 2524 (2003).
- [70] G. Li, Y. Luo, X. Zheng, G. Masini, A. Mekis, *et al.* Improving CMOS-compatible Germanium photodetectors. *Opt. Express* 20(24), 26345 (2012).
- [71] J. Brouckaert, W. Bogaerts, P. Dumon, D. Van Thourhout, and R. Baets. Planar Concave Grating Demultiplexer Fabricated on a Nanophotonic Silicon-on-Insulator Platform. J. Light. Technol. 25(5), 1269 (2007).
- [72] H. Rong, R. Jones, A. Liu, O. Cohen, D. Hak, *et al.* A continuous-wave Raman silicon laser. *Nature* 433(7027), 725 (2005).
- [73] J. Liu, X. Sun, R. Camacho-Aguilera, L. C. Kimerling, and J. Michel. Ge-on-Si laser operating at room temperature. *Opt. Lett.* 35(5), 679 (2010).
- [74] J. Kurihara, D. Yamashita, N. Tanaka, T. Asano, S. Noda, *et al.* Detrimental Fluctuation of Frequency Spacing between the Two High-Quality Resonant Modes in a Raman Silicon Nanocavity Laser. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 26(2), (2020).
- [75] C. Gunn. CMOS Photonics for High-Speed Interconnects. *IEEE Micro* 26(2), 58 (2006).
- [76] C. Batten, A. Joshi, V. Stojanovic, and K. Asanovic. Designing chip-level nanophotonic interconnection networks. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.* 2(2), 137 (2012).
- [77] C. Sun, M. T. Wade, Y. Lee, J. S. Orcutt, L. Alloatti, et al. Single-chip microprocessor that

communicates directly using light. Nature 528(7583), 534 (2015).

- [78] H. Altug, D. Englund, and J. Vučković. Ultrafast photonic crystal nanocavity laser. *Nat. Phys.* 2(7), 484 (2006).
- [79] W. D. Zhou, J. Sabarinathan, P. Bhattarcharya, B. Kochman, E. W. Berg, *et al.* Characteristics of a photonic bandgap single defect microcavity electroluminescent device. *IEEE J. Quantum Electron.* 37(9), 1153 (2001).
- [80] J. Topol'ancik, S. Chakravarty, P. Bhattacharya, and S. Chakrabarti. Electrically injected quantum-dot photonic crystal microcavity light sources. *Opt. Lett.* **31**(2), 232 (2006).
- [81] S. Chakravarty, P. Bhattacharya, J. Topol'Anik, and Z. Wu. Electrically injected quantum dot photonic crystal microcavity light emitters and microcavity arrays. J. Phys. D. Appl. Phys. 40(9), 2683 (2007).
- [82] L.-X. Zou, X.-M. Lv, Y.-Z. Huang, H. Long, Q.-F. Yao, *et al.* Four-wavelength microdisk laser array laterally coupled with a bus waveguide. *Opt. Lett.* 38(19), 3807 (2013).
- [83] K. Nozaki, A. Nakagawa, D. Sano, and T. Baba. Ultralow threshold microgear lasers and their fusion with quasiperiodic photonic crystals. in *CLEO/Pacific Rim 2003. The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (IEEE Cat. No.03TH8671)* vol. 1 169 (IEEE, 2003).
- [84] C. Reese, B. Gayral, B. D. Gerardot, A. Imamoğlu, P. M. Petroff, et al. High-Q photonic crystal microcavities fabricated in a thin GaAs membrane. J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. 19(6), 2749 (2001).
- [85] C. Monat, C. Seassal, X. Letartre, P. Regreny, P. Rojo-Romeo, *et al.* Modal analysis and engineering on inp-based two-dimensional photonic-crystal microlasers on a si wafer. *IEEE J. Quantum Electron.* 39(3), 419 (2003).
- [86] S. G. Johnson, S. Fan, A. Mekis, and J. D. Joannopoulos. Multipole-cancellation mechanism for high- Q cavities in the absence of a complete photonic band gap. *Appl. Phys. Lett.* 78(22), 3388 (2001).
- [87] D. L. Huffaker, D. G. Deppe, K. Kumar, and T. J. Rogers. Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers. *Appl. Phys. Lett.* 65(1), 97 (1994).
- [88] J. O'Brien, W. Kuang, J.-R. Cao, M.-H. Shih, P.-T. Lee, *et al.* Photonic crystal microcavity lasers. J. Phys. D. Appl. Phys. 40(9), 2671 (2007).
- [89] Y. Miyamoto, Y. Xiong, T. Okada, M. Morifuji, H. Kajii, et al. Optical coupling

characteristics between a circular defect resonator and a waveguide in a two-dimensional photonic crystal slab. *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.* **31**(June), 168 (2018).

- [90] M. Haurylau, G. Chen, H. Chen, J. Zhang, N. A. Nelson, *et al.* On-chip optical interconnect roadmap: Challenges and critical directions. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 12(6), 1699 (2006).
- [91] W. Bogaerts, P. Dumon, D. Van Thourhout, D. Taillaert, P. Jaenen, et al. Compact Wavelength-Selective Functions in Silicon-on-Insulator Photonic Wires. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 12(6), 1394 (2006).
- [92] J. Michel, J. Liu, and L. C. Kimerling. High-performance Ge-on-Si photodetectors. *Nat. Photonics* 4(8), 527 (2010).
- [93] S. Maimon, E. Finkman, G. Bahir, S. E. Schacham, J. M. Garcia, *et al.* Intersublevel transitions in InAs/GaAs quantum dots infrared photodetectors. *Appl. Phys. Lett.* **73**(14), 2003 (1998).
- [94] J. B. Héroux, X. Yang, and W. I. Wang. GalnNAs resonant-cavity-enhanced photodetector operating at 1.3 µm. Appl. Phys. Lett. 75(18), 2716 (1999).
- [95] L. Alloatti, and R. J. Ram. Resonance-enhanced waveguide-coupled silicon-germanium detector. *Appl. Phys. Lett.* **108**(7), (2016).
- [96] N. Hatori, T. Shimizu, M. Okano, M. Ishizaka, T. Yamamoto, *et al.* A hybrid integrated light source on a silicon platform using a trident spot-size converter. *J. Light. Technol.* 32(7), 1329 (2014).
- [97] L. A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Mašanović. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. (John Wiley & Sons, Inc., 2012).
- [98] C. Kittel. Introduction to Solid State Physics. (Wiley, 2005).
- [99] K. Nozaki, and T. Baba. Carrier and photon analyses of photonic microlasers by twodimensional rate equations. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **23**(7), 1411 (2005).
- [100] 栖原敏明. 量子電子工学. (オーム社, 1994).
- [101] J. Bowers, B. Hemenway, A. Gnauck, and D. Wilt. High-speed InGaAsP constricted-mesa lasers. *IEEE J. Quantum Electron.* 22(6), 833 (1986).
- [102] K. Naoe, T. Nakajima, Y. Nakai, Y. Yamaguchi, Y. Sakuma, et al. Uncooled 53-Gbaud PAM4 Operation of EA/DFB and Directly Modulated DFB Laser for 400GbE Applications. in 2019 Compound Semiconductor Week (CSW) vol. 4 1 (IEEE, 2019).

- [103] G. Mur. Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* EMC-23(4), 377 (1981).
- [104] X. Zhang, K. Takeuchi, X. Cong, Y. Xiong, M. Morifuji, *et al.* Dry etching of deep air holes in GaAs/AlGaAs-based epi-wafer having InAs quantum dots for fabrication of photonic crystal laser. *Jpn. J. Appl. Phys.* 56(12), 126501 (2017).
- [105] A. Faraon, E. Waks, D. Englund, I. Fushman, and J. Vučković. Efficient photonic crystal cavity-waveguide couplers. *Appl. Phys. Lett.* **90**(7), 073102 (2007).
- [106] S. Matsuo, T. Sato, K. Takeda, A. Shinya, K. Nozaki, et al. Photonic crystal lasers using wavelength-scale embedded active region. J. Phys. D. Appl. Phys. 47(2), 023001 (2014).
- [107] J. W. Coburn, and H. F. Winters. Ion- and electron-assisted gas-surface chemistry An important effect in plasma etching. J. Appl. Phys. 50(5), 3189 (1979).
- [108] K. Aoki, H. Suzuki, and T. Yamauchi. High Density Plasma Sources for Semiconductors and TFT-LCD Processes. *Toshiba Rev.* 55(4), 17 (2000).
- [109] H. Tamura, and H. Kurihara. GaAs and GaAlAs Reactive Ion Etching in BCl 3 -Cl 2 Mixture. *Jpn. J. Appl. Phys.* 23(Part 2, No. 9), L731 (1984).
- [110] M. A. Blauw, T. Zijlstra, and E. van der Drift. Balancing the etching and passivation in timemultiplexed deep dry etching of silicon. J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. 19(6), 2930 (2001).
- [111] M. Volatier, D. Duchesne, R. Morandotti, R. Arès, and V. Aimez. Extremely high aspect ratio GaAs and GaAs/AlGaAs nanowaveguides fabricated using chlorine ICP etching with N 2 -promoted passivation. *Nanotechnology* 21(13), 134014 (2010).
- [112] K. Takeda, T. Sato, A. Shinya, K. Nozaki, W. Kobayashi, *et al.* Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers. *Nat. Photonics* 7(7), 569 (2013).
- [113] Y. Xiong, T. Umeda, X. Zhang, M. Morifuji, H. Kajii, *et al.* Photonic Crystal Circular-Defect Microcavity Laser Designed for Wavelength Division Multiplexing. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 24(6), 1 (2018).
- [114] T. Yamaguchi, T. Horiba, M. Morifuji, and M. Kondow. Transmission Characteristics of a Novel Waveguide Structure for Wavelength Division Multiplexing. in 2019 Compound Semiconductor Week (CSW) 1 (IEEE, 2019).

- [115] M. Nakao, S. Oku, T. Tamamura, K. Yasui, and H. Masuda. GaAs and InP Nanohole Arrays Fabricated by Reactive Beam Etching Using Highly Ordered Alumina Membranes. *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**(Part 1, No. 2B), 1052 (1999).
- [116] C. C. Cheng. New fabrication techniques for high quality photonic crystals. J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. 15(6), 2764 (1997).
- [117] D.-P. Kim, J.-W. Yeo, and C.-I. Kim. Etching properties of Al2O3 films in inductively coupled plasma. *Thin Solid Films* **459**(1–2), 122 (2004).

謝辞

本研究は、大阪大学大学院工学研究科近藤正彦教授の御指導と御鞭撻を賜ることで、 ここに博士論文としてまとめることができたものです。本研究を進めるにあたり、常日 頃からの丁寧な御指導、大変貴重な御議論、そして何より暖かい御支援と激励を頂き、 本研究をここまで発展させることができました。衷心より感謝の意と御礼の言葉を申し 上げます。

大阪大学大学院工学研究科の片山竜二教授、大岩顕教授には、本論文の執筆にあたり 貴重な御指導、また御議論をいただきました。深い見識に基づく数々の御指導は、本論 文をまとめるにあたり、大変参考となりました。衷心より感謝の意と御礼の言葉を申し 上げます。また、著者が大阪大学大学院工学研究科に在学中、御親切な指導を賜りまし た大阪大学の伊藤利道教授、廣瀬哲也教授、森伸也教授、森勇介教授、丸田章博教授、 尾崎雅則教授、八木哲也教授、片山光浩教授、栖原敏明名誉教授に衷心より感謝の意と 御礼の言葉を申し上げます。

梶井博武准教授、森藤正人助教には、研究を進める中で貴重な御議論をいただきました。幅広い見識に基づく御助言は、本研究を遂行する上で大きな糧となりました。衷心より感謝の意と御礼の言葉を申し上げます。

本研究の遂行にあたり多くのご協力を頂き、研究生活を過ごす上で大変おせわになり ました三科健准教授、久保等特任研究員、張秀宇氏、井上聖貴氏、笠松郷志氏、河内勇 輝氏、仲本健太氏、須賀昇舞氏、田伐俊介氏、谷佳樹氏、宮本雄次氏、吉永真啓氏、梅 田拓馬氏、奥井陽有人氏、竹内健斗氏、時岡駿氏、中原佳祐氏、丸谷篤史氏、叢宵龍氏、 Elbert He 氏、佐伯亮太、溝口舜、山口拓也氏、曽理氏、小暮崇史氏、羽倉孝太朗氏、樋 口拓也氏、奥長拓海氏、葉漢嶠氏、 宮崎亮輔氏、 伊山京助氏、青盛翔太氏、大貫大地 氏、黒木雄敏氏、黄毛蔚氏に衷心より感謝の意と御礼の言葉を申し上げます。

最後にここまで育ててくれ、長い期間、しかもこのような恵まれた環境で学問に触れ る機会を与えてくれた両親に、心から感謝します。

業績目録

7.1.1.1 学術論文

- Xiuyu Zhang, Kento Takeuchi, Xiaolong Cong, <u>Yifan Xiong</u>, Masato Morifuji, et al., "Dry etching of deep air holes in GaAs/AlGaAs-based epi-wafer having InAs quantum dots for fabrication of photonic crystal laser," *Japanese Journal of Applied Physics* 56(12), 126501 (2017).
- <u>Yifan Xiong</u>, Takuma Umeda, Xiuyu Zhang, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta and Masahiko Kondow, "Photonic Crystal Circular-Defect Microcavity Laser Designed for Wavelength Division Multiplexing," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 24(6), 4900207(2018).
- Yuji Miyamoto, <u>Yifan Xiong</u>, Tomoyuki Okada, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Masahiko Kondow, "Optical coupling characteristics between a circular defect resonator and a waveguide in a two-dimensional photonic crystal slab," *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications* **31**, 168(2018).
- <u>Yifan Xiong</u>, Hanqiao Ye, Takuma Umeda, Shun Mizoguchi, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta and Masahiko Kondow, "Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser," *Photonics* 6(2), 54(2019).
- <u>Yifan Xiong</u>, Yoshiki Tani, Xiaolong Cong, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta and Masahiko Kondow, "Selective dry etching GaAs/AlO_x for realizing electrical isolation on monolithic integrated photonic crystal laser array," *Japanese Journal of Applied Physics* 59, 086505(2020).

- Hanqiao Ye, Tomoya Nishimura, <u>Yifan Xiong</u>, Takuya Yamaguchi, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Masahiko Kondow, "Theoretical Analysis on Operation Speed of the Circular Defect in 2D Photonic Crystal (CirD) Laser," *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science* 2000411(2020).
- Hanqiao Ye, Ryota Saeki, <u>Yifan Xiong</u>, Takashi Kogure, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta, and Masahiko Kondow, "Oblique deposition of Ti/Pt/Au electrode on photonic crystal for vertical current injection." *Applied Sciences* 10(23), 1 (2020).

7.1.1.2 国際学会発表

- <u>Yifan Xiong</u>, Tomoyuki Okada, Masato Morifuji, and Masahiko Kondow, "Novel design for whispering gallery mode of two-dimensional circle-defect photonic crystal microcavity," *3rd KANSAI Nanoscience and Nanotechnology International Symposium*, PS-73, Osaka, Japan, Dec. 8, 2015.
- [invited] Masahiko Kondow, Xiuyu Zhang, <u>Yifan Xiong</u>, and Masato Morifuji, "Stimulated emission from photonic crystal cavity with AlOx cladding layer," 2016 Collaborative Conference on 3D & Materials Research, Mo-111-9, Seoul, Korea, Jun. 20, 2016.
- <u>Yifan Xiong</u>, Tomoyuki Okada, Xiuyu Zhang, Masato Morifuji, and Masahiko Kondow, "Numerical Demonstration of the Feasibility of the Current Driven Photonic Crystal Laser Diode Used for Wavelength Division Multiplexing," *43rd International Symposium on Compound Semiconductors*, MoP-ISCS-030, Toyama, Japan, Jun. 27, 2016.
- 4. <u>Yifan Xiong</u>, Xiuyu Zhang, Elbert He, Ryo Tezuka, Takafumi Hino, Satoshi Kasamatsu,

Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Masahiko Kondow, "Photonic Crystal Laser with Low-Quality Factor," *25th International Semiconductor Laser Conference*, WE50, Kobe, Japan, Sept. 14, 2016.

- Hirotake Kajii, Yutaka Ohmori, <u>Yifan Xiong</u>, Masato Morifuji, and Masahiko Kondow, "Light-emitting devices for nanophotonics and optical signal transmission," *Global Nanophotonics* 2016, P-49, Osaka, Japan, Nov. 30, 2016.
- <u>Yifan Xiong</u>, Xiuyu Zhang, Elbert He, Ryo Tezuka, Takafumi Hino, Satoshi Kasamatsu, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta and Masahiko Kondow, "Photonic Crystal Laser with Air/AlOx cladding layers," *4th KANSAI Nanoscience and Nanotechnology International Symposium*, P1-23, Osaka, Japan, Dec. 13, 2016.
- [invited] Masahiko Kondow, Xiuyu Zhang, <u>Yifan Xiong</u>, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Akihiro Maruta, "Photonic crystal laser with quantum dots as active material grown by MBE," *Energy Materials Nanotechnology (EMN) Europe Meetings on Epitaxy*, MBE-1-1 Barcelona, Spain, Sept. 12, 2017.
- [invited] Masahiko Kondow, Xiuyu Zhang, <u>Yifan Xiong</u>, Masato Morifuji, Hirotake. Kajii, and Akihiro Maruta, "Single mode lasing operation of Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser," *Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2017*, Thurs-303A-4, Jeju, South Korea, Jun. 29, 2017.
- Masahiko Kondow, Takafumi Hino, Satoshi Kasamatsu, Shobu Suga, Xiuyu Zhang, <u>Yifan Xiong</u>, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta, and Masato Morifuji, "Photonic Crystal Circular Defect Laser for Intra-chip Optical Interconnections," *Compound Semiconductor Week (CSW) 2017*, P1.23, Berlin, Germany, May 15, 2017.

- [invited] Masahiko Kondow, <u>Yifan Xiong</u>, Xiuyu Zhang, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Akihiro Maruta, "Suitable quality (Q) factor for photonic crystal laser grown by MBE," *Energy Materials Nanotechnology (EMN) Europe Meetings on Epitaxy*, MBE-II-1, Vienna, Austria, June 20, 2018.
- [invited] <u>Yifan. Xiong</u>, Yoshiki Tani, Xiaolong Cong, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta. and Masahiko Kondow, "Electrical Isolation for Monolithic Photonic Crystal Laser Array Realized by Selective Dry Etching of GaAs/AlOx Films," *Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2018*, Wed-111-9, Seoul, South Korea, Jun. 27, 2018.
- Takuma Umeda, <u>Yifan Xiong</u>, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta, and Masahiko Kondow, "1.3 μm range single mode operation of photonic crystal circulardefect microcavity laser with InAs quantum dots," 20th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE2018), Mo-P-31, Shanghai, China, Spt. 3, 2018.
- [invited] Masahiko Kondow, <u>Yifan Xiong</u>, Li Zeng, Masato Morifuji, Hirotake. Kajii, and Akihiro Maruta, "Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser," *The 26th International Conference on Advanced Nanotechnology*, Fri-Keynote-3, Moscow, Russia, Oct. 5, 2018.
- [invited] Masahiko Kondow, Takuya Yamaguchi, <u>Yifan Xiong</u>, Takuma Umeda, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Akihiro Maruta, "CirD photonic crystal laser with high mesa waveguide for light output," 2019 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR 2019), Tu-208A-7, Goyang, South Korea, 2019.
- 15. Shun Mizoguchi, <u>Yifan Xiong</u>, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta, and Masahiko Kondow, "Fabrication of Circular Defect Photonic Crystal Laser by Dry Etching," *Asia Pacific Society for Materials Research(APSMR) 2019 Annual Meeting*, P-

15, Sapporo, Japan, 2019.

- Hanqiao Ye, Tomoya Nishimura, Takuya Yamaguchi, <u>Yifan Xiong</u>, Masoato Morifuji, Hirotake Kajii, Masahiko Kondow, "High frequency characteristics analysis of photonic crystal circular defect laser," *Asia Pacific Society for Materials Research(APSMR) 2019 Annual Meeting*, P-16, Sapporo, Japan, 2019.
- [invited] Masahiko Kondow, <u>Yifan Xiong</u>, Hanqiao Ye, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Akihiro Maruta, "Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser for Intra-chip Optical Interconnections," *International Conference on Advanced Nanotechnology and Nanomaterials 2019*, Keynote-3, Dubai, UAE, 2019.

7.1.1.3 国内会議

- 井上聖貴,張秀宇,<u>熊一帆</u>,森藤正人,梶井博武,近藤正彦,"フォトニック結晶 構造作製に向けたレジストマスクを用いる GaAs ドライエッチング," *薄膜材料* デバイス研究会 第13回研究集会,京都,2016年 10月.
- <u>Yifan Xiong</u>, Xiuyu Zhang, Elbert He, Ryo Tezuka, Takafumi Hino, Satoshi Kasamatsu, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Masahiko Kondow, "Photonic crystal microcavity laser with low-quality factor," *36th Electronic Materials Symposium*, We1-3, Nagahama, Nov. 8, 2017.
- 3. 叢 宵龍, <u>熊 一帆</u>, 谷 佳樹, 森藤 正人, 梶井 博武, 丸田 章博, 近藤 正彦, "GaAs/AlOx 膜の選択的ドライエッチングによるモノリシックフォトニック結晶 レーザアレイの電気的分離," 2018 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイ エティ大会, C-4-3, 金沢, 2018年9月.

- 4. 葉 漢橋, 西村智也, <u>熊 一帆</u>, 山口 拓也, 森藤 正人, 梶井 博武, 近藤 正彦, "フ ォトニック結晶円形欠陥レーザの高速動作解析," 2019 年電子情報通信学会ソサ イエティ大会, C-3-63, 大阪大学豊中キャンパス(豊中市) 2019 年 9 月.
- 溝口 舜, <u>熊 一帆</u>, 森藤 正人, 梶井 博武, 丸田 章博, 近藤 正彦, "フォトニック 結晶円形欠陥レーザ構造の ICP ドライエッチングによる作製," 2019 年電子情報 通信学会ソサイエティ大会, C-3-16, 大阪大学豊中キャンパス(豊中市) 2019 年 9 月.
- 6. 樋口 拓也, <u>熊一帆</u>,山口拓也,森藤正人,梶井博武 近藤正彦,"波長多重通信に向けたフォトニック結晶における直交格子導波路の作製,"2019 年電子情報通信 学会ソサイエティ大会, C-3-16,大阪大学豊中キャンパス(豊中市)2019年9月.
- <u>Yifan Xiong</u>, Yoshiki Tani, Xiaolong Cong, Masato Morifuji, Masahiro Uemukai, Hirotake Kajii, Aakihiro Maruta, and Masahiko Kondow, "Selective dry etching of GaAs/AlOx with photonic crystal structure for wavelength division multiplexing," 38th Electronic Materials Symposium, Fr1-6, Nara, Oct. 9, 2019.
- Takumi Okunaga, <u>Yifan Xiong</u>, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Masahiko Kondow, "Selective etching of GaAs core layer with embedded InAs quantum dot layer towards photonic crystal laser fabrication," *38th Electronic Materials Symposium*, Th2-8, Nara, Oct. 9, 2019.
- Kotaro Hagura, Takuya Yamaguchi, <u>Yifan Xiong</u>, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, and Masahiko Kondow, "Fabrication of photonic crystal laser structure with output high-mesa waveguide," *38th Electronic Materials Symposium*, Fr1-6, Nara, Oct. 9, 2019.
- 10. 樋口 拓也, 熊 一帆, 山口 拓也, 森藤 正人, 梶井 博武, 近藤正彦, "波長多重

通信デバイス作製に向けたフォトニック結晶直交格子導波路に関する研究," 2020 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-3/4-11, 2020 年 9 月 16 日.

 小暮 崇史, <u>熊 一帆</u>, 森藤 正人, 梶井 博武, 近藤 正彦, "フォトニック結晶円 形欠陥レーザ構造への電流注入に関する研究," 2020 年電子情報通信学会エレク トロニクスソサイエティ大会, C-3/4-12, 2020 年 9 月 16 日.

7.1.1.4 受賞

第38回電子材料シンポジウム EMS 賞(2019)