



Title	円形欠陥フォトリ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

円形欠陥フォトリ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 序論	1
1.1 緒言	1
1.2 フォトニック結晶	2
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	3
1.2.2 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
1.3.1 バンド端2次元フォトニック結晶レーザ	8
1.3.2 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
2.2.1 円形欠陥共振器	15
2.2.2 レーザのヘテロ層構成	17
2.2.3 共振器と導波路の結合	18
2.3 レーザアレイ	19
2.3.1 アレイ構成	20
2.3.2 フォトダイオードアレイとの組み合わせ	21
2.3.3 電子回路への実装	23
第 3 章 円形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
3.2.1 理論モデルの構築	26
3.2.2 閾値電流	29
3.2.3 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	要素技術.....	52
4.1	緒言	52
4.2	電子線リソグラフィ.....	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	円形欠陥フォトリソニック結晶レーザの光学特性評価	62
5.1	緒言	62
5.2	測定系	63
5.3	Air/AIO _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 AIO _x 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	GaAs/AIO_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.....	82
6.1	緒言	82
6.2	平坦な GaAs/AIO _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	フォトリソグラフィ構造を有する GaAs/AlO _x 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	結論.....	105
参考文献	107
謝辞	117
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 1 Gbps/cm² からボード間の 1 Tbps/cm² となり、さらにチップ間の 10 Tbps/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 1 Tbps の帯域幅が必要となる。光モジュールが占める面積を 1×10^{-4} cm² に規定すると、チップ内光伝送を実現するには 10 Pbps/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 μ m、幅~1 μ m 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/cm^2 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[41–

46]、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、グラフィ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、 $\pi/3$ 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 \mathbf{a}_1 と \mathbf{a}_2 は格子定数 a を用いて、

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

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

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 と \mathbf{G}_2 は

$$\mathbf{G}_1 = \left(1, \frac{-1}{\sqrt{3}}, 0\right) \frac{2\pi}{a} \quad (1.3)$$

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

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二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 \mathbf{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。 Γ 、 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。

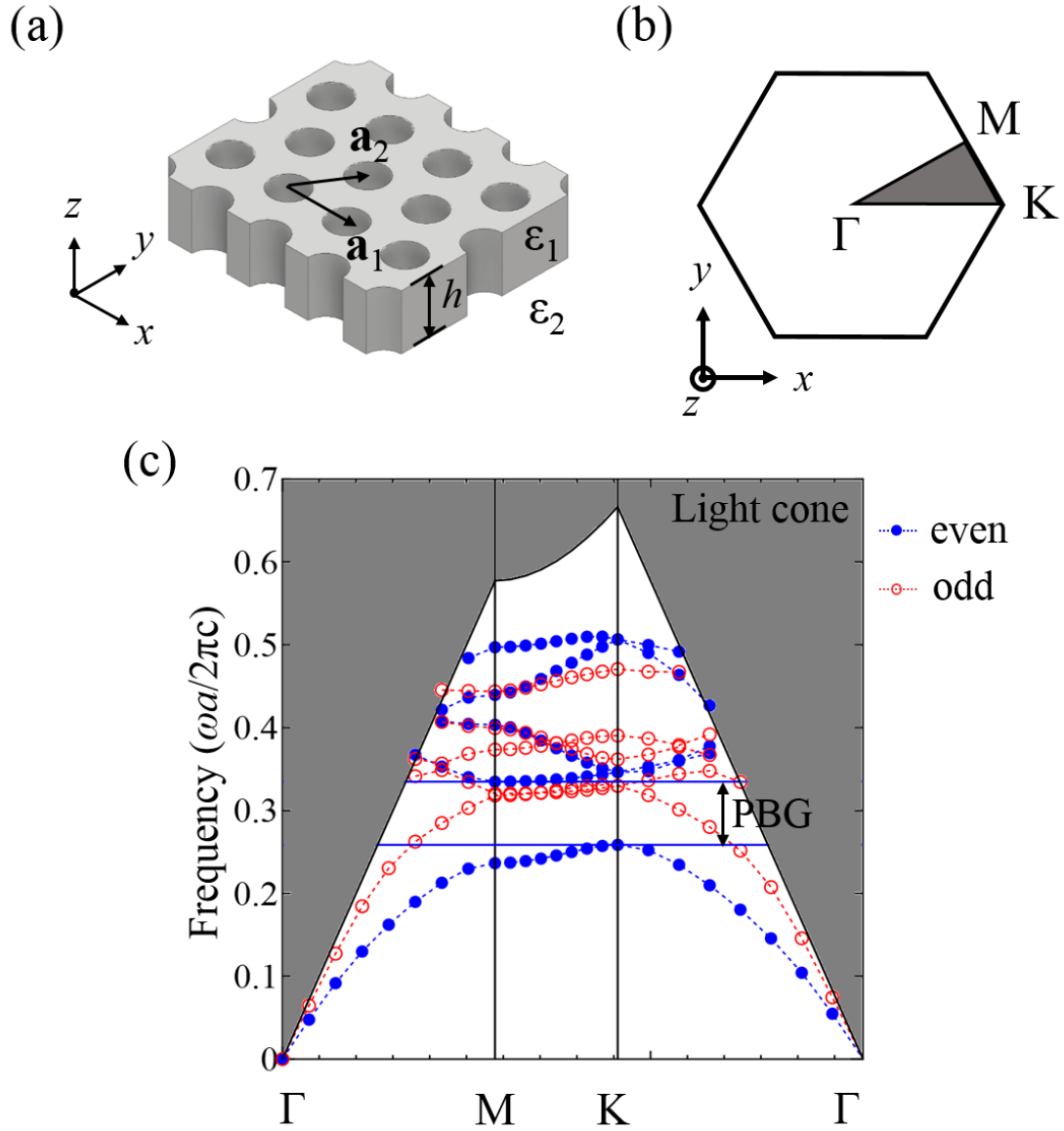


図 1.1: (a) 2次元スラブ型三角格子フォトニック結晶構造、(b) それに対応する第一 Brillouin 領域、(c) それに対応するバンド構造 ($\epsilon_1 = 11.56$ 、 $\epsilon_2 = 1$ 、 $a = 360 \text{ nm}$ 、 $r = 0.3 a$ 、 $h = 220 \text{ nm}$)

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 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ が xy 平面に平行) と TM モード (磁界 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 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 ($\mathbf{E}_{\text{TE}} \cdot \mathbf{E}_{\text{TM}} = 0$) 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 $\epsilon_1 = 11.56$ (GaAs) とし、空孔及びスラブを挟むクラッド層の比誘電率を $\epsilon_2 = 1$ 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、 $0.3a$ 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

$$\omega \geq \frac{c}{n_{\text{clad}}} |k| \quad (1.5)$$

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 $\omega a / 2\pi c = 0.258 \sim 0.334$ 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方向に空孔を一行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 ($1a \times 8a$) 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。

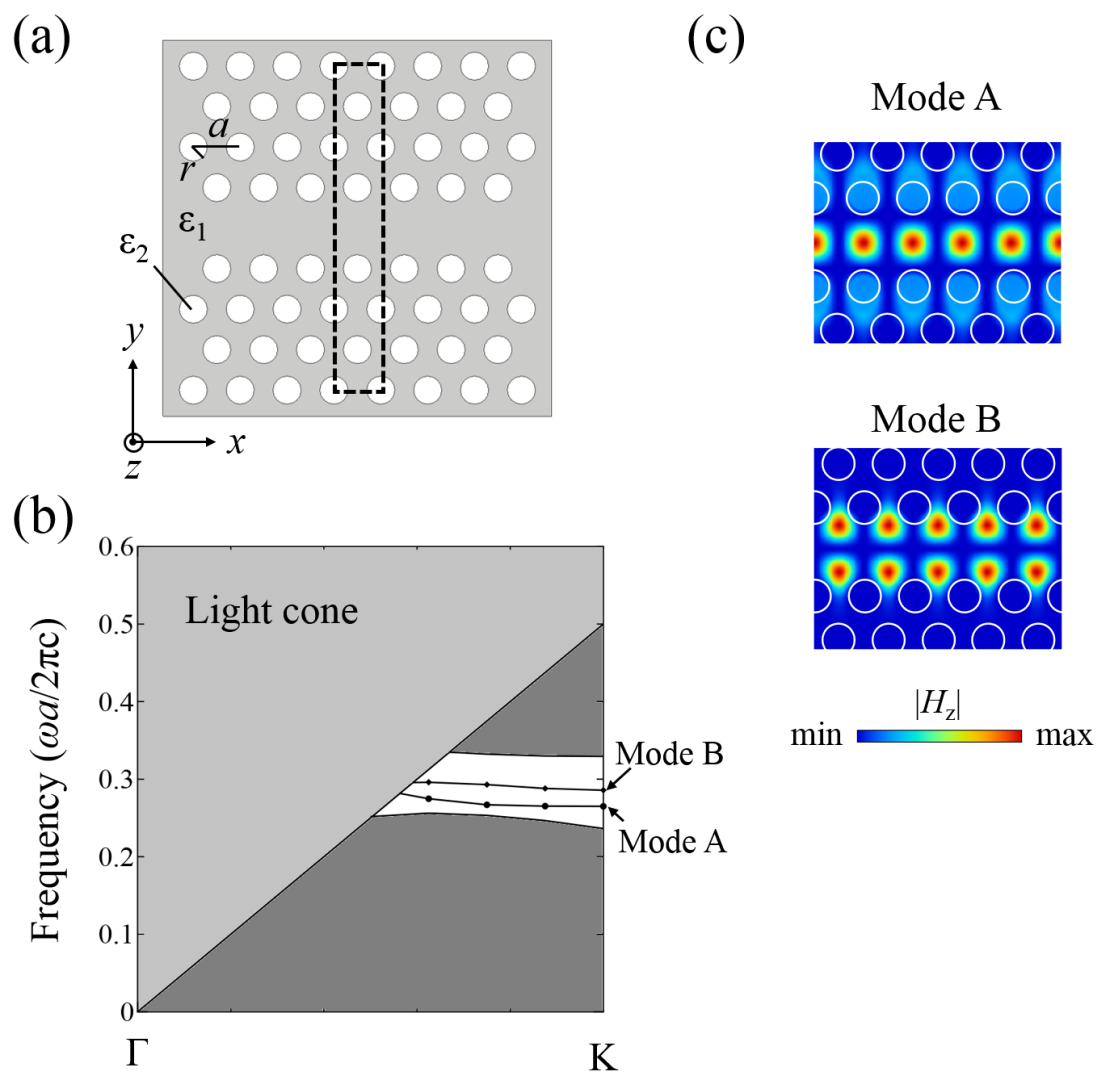


図 1.2: (a) 直線欠陥を持つ 2 次元スラブ型三角格子フォトニック結晶構造、 (b) それに対応する even モードのバンド構造 (明るい灰色領域: 光円錐、暗い灰色領域: スラブモード領域)、 (c) モード A とモード B の磁界分布図 (白丸: 空孔位置)

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 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 120^\circ$ 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。

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 $4.8 \mu\text{A}$ 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 $40.5 \mu\text{A}$ 、最大出力パワー $4 \mu\text{W}$ 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。まずは、レーザの微分抵抗が約 5

$k\Omega$ 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い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 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{CH}_4$ 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 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 円形欠陥フォトリ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 10 m (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リック技術により、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、シリコンフォトリック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、シリコンフォトリックと 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 円形欠陥フォトリック結晶レーザ

欠陥共振器型フォトリック結晶レーザは、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リ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リ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リック

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/AlO_x 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。

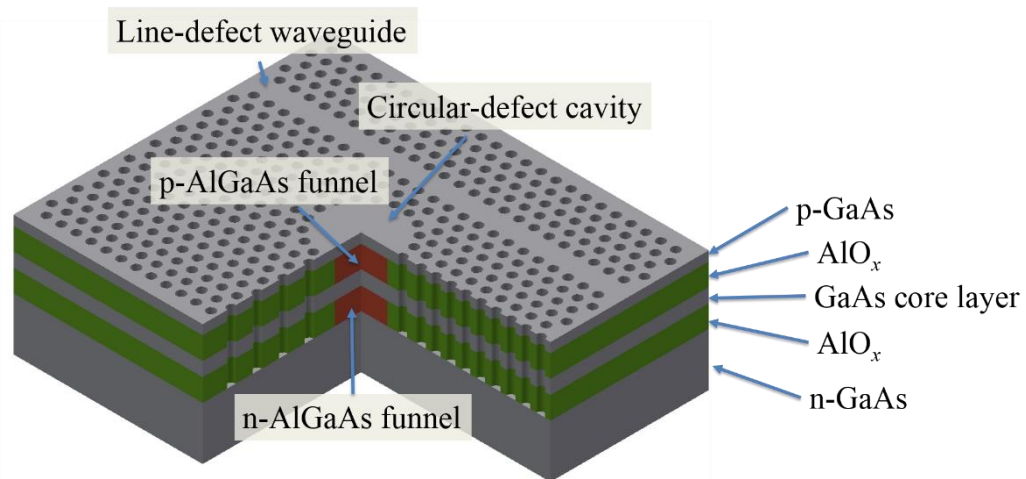


図 2.1: 電流注入型 CirD レーザの概略図[6]

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、単一の 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た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。

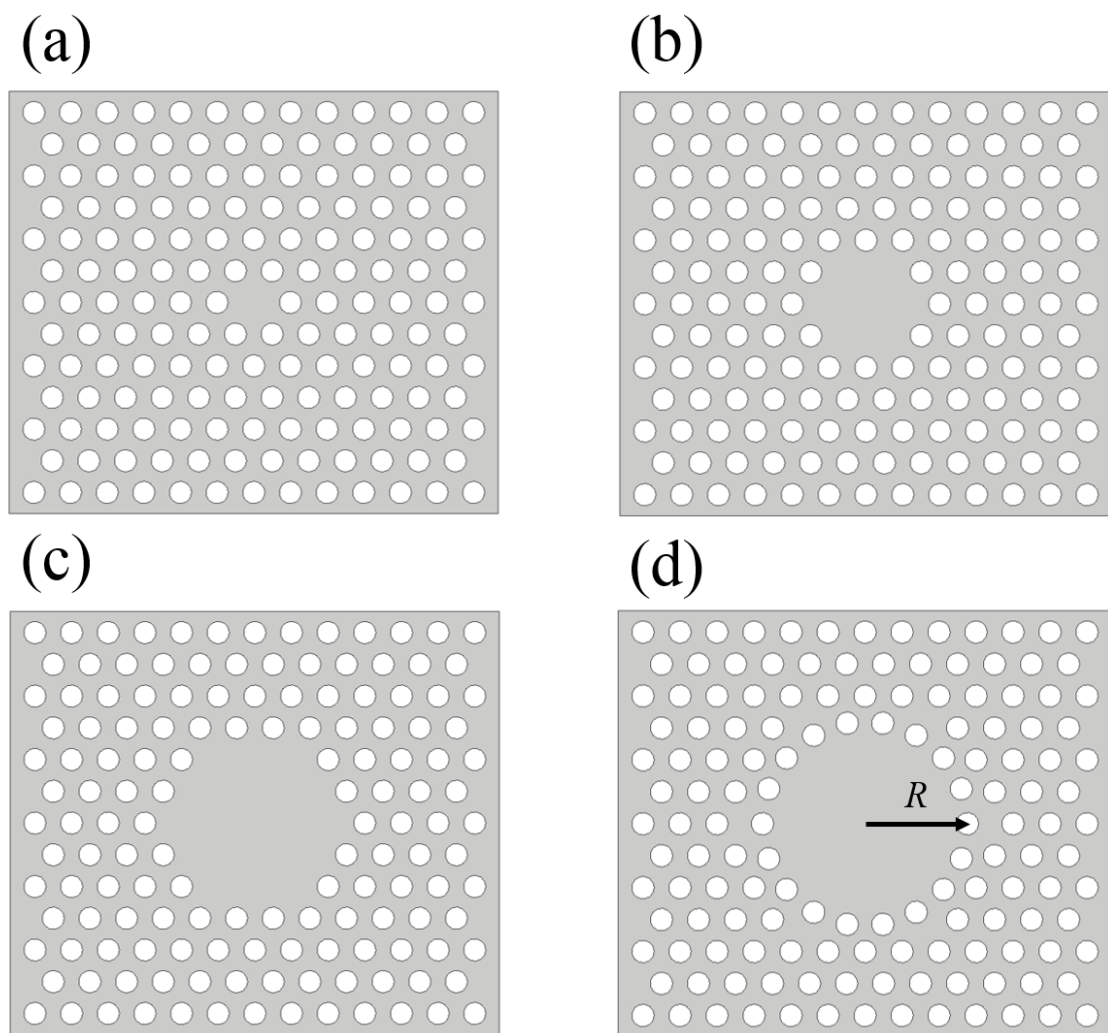


図 2.2: 共振器の概略図 (a) H1 共振器、(b) H2 共振器、(c) H3 共振器、(d) 円形欠陥共振器

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 / AlO_x クラッド層、GaAs コア層、 n -AlGaAs / AlO_x 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。

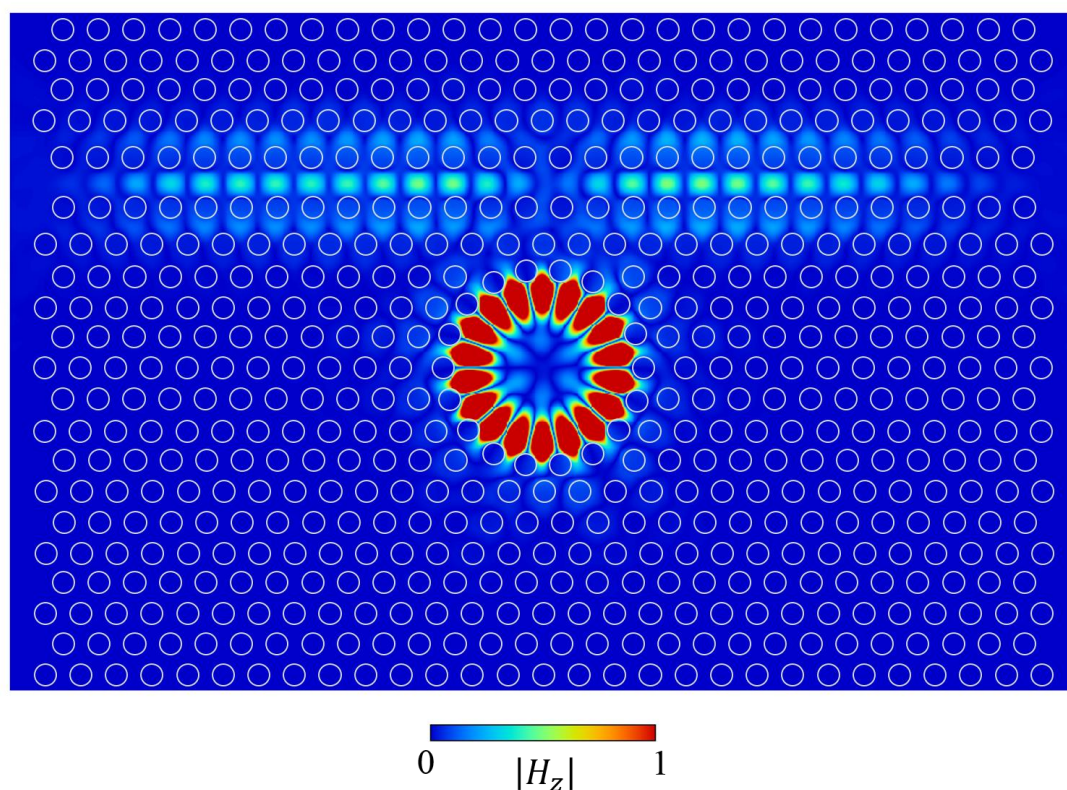


図 2.3: CirD レーザにおける WGM とモード A を結合する際の磁界分布図 (白丸: 空孔位置) [6]

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。

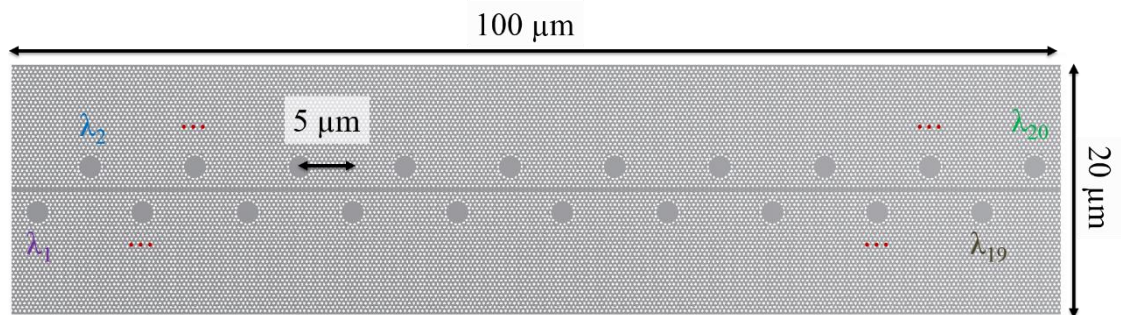


図 2.4: WDM を実現する CirD レーザアレイの概略図[6]

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) を作ることで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 $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ の領域がボンディングパッド (Soldering area) として設計している。

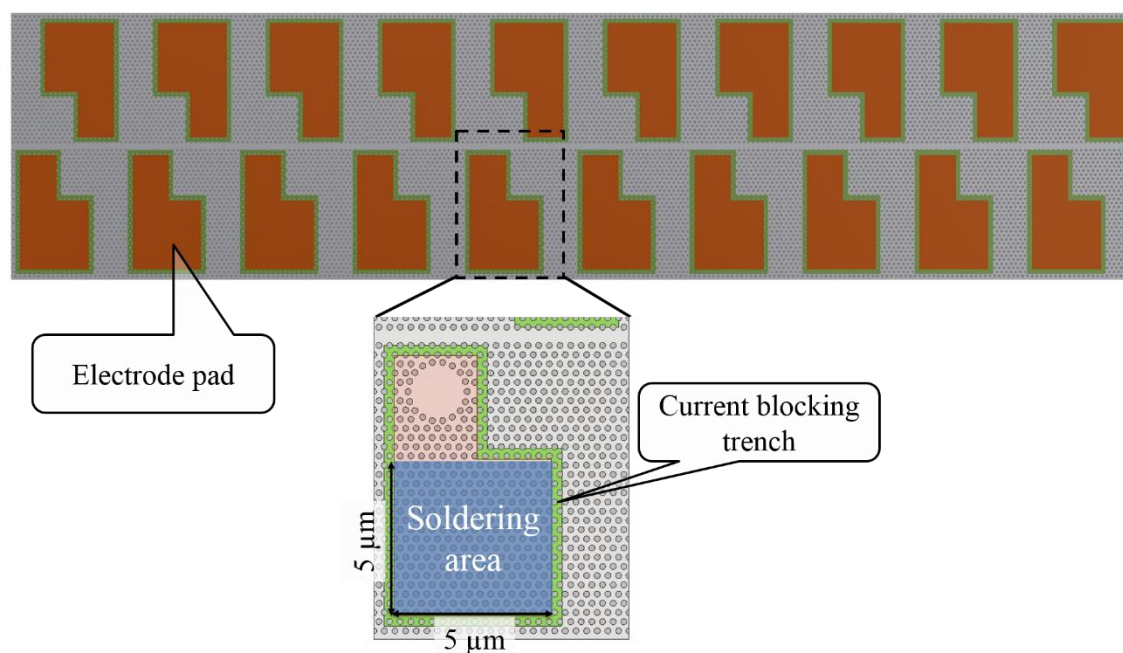


図 2.5: 電流分離溝と電極を作製後の CirD レーザアレイの概略図[6]

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 $1.1\ \mu\text{m}$ にあるため、シリコン導波路は $1.3\ \mu\text{m}$ と $1.5\ \mu\text{m}$ 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リック結晶 PD アレイを提案する。

円形欠陥フォトリック結晶 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リック結晶 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 $200\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ である。ここで、簡単のために円形欠陥フォトリック結晶 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。

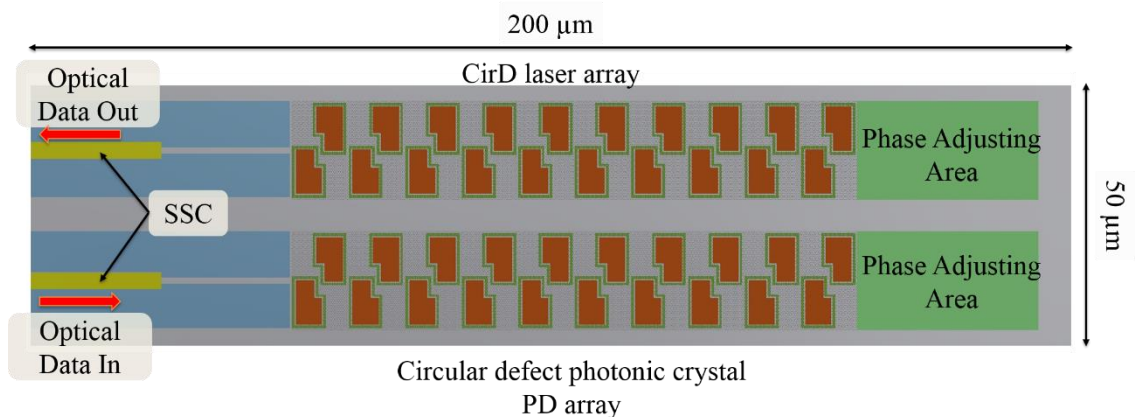


図 2.6: CirD レーザアレイと円形欠陥フォトニック結晶 PD アレイを組み合わせた光モジュールの概略図[6]

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。

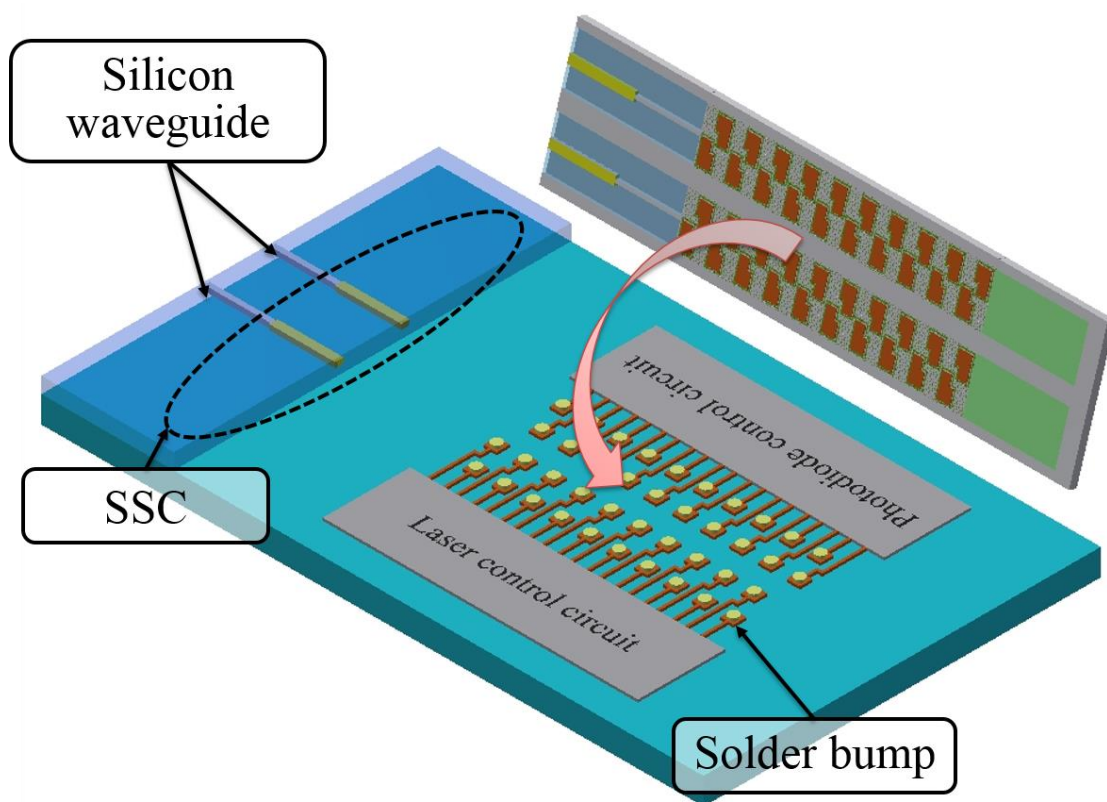


図 2.7: フリップチップボンディングにより光モジュールをシリコン基板へ実装する模式図[6]

第3章 円形欠陥フォトリ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リ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 (Finite-difference 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

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV_{\text{are}}} - \frac{N}{\tau_c} - \Gamma_z G(N)S \quad (3.1)$$

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

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。 Γ_z 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、

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

で表される。 c は真空中の光速、 n_{eff} は活性層の実効屈折率、 g_0 は利得係数である。 N_{tr} 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、

$$\tau_{\text{ph}} = \frac{\lambda}{2\pi c} Q \quad (3.4)$$

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いないため、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

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

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 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 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 $\int |\tilde{E}|^2 dx dy = 1$ 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は

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV_{\text{are}}} - \frac{N}{\tau_c} - \Gamma_z A_m G(N) S |\tilde{E}|^2 + D \nabla^2 N \quad (3.6)$$

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

となる[6,99]。ここで、 A_m は実効モード領域であり、

$$A_m = \frac{\int |\tilde{E}|^2 dx dy}{|\tilde{E}|_{\text{max}}^2} \quad (3.8)$$

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。

表 3.1: レート方程式計算に用いたパラメータの値

パラメータ	記号	値
キャリア注入領域	V_{are}	$2.23 \times 10^{-20} \text{ m}^3$
キャリア寿命	τ_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	n_{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	a	340 nm
空孔半径	r	$0.3 a$
AlGaAs ファネル半径		$1.75 a$

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 $1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ 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 $1 \text{ kA}/\text{cm}^2$ 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。

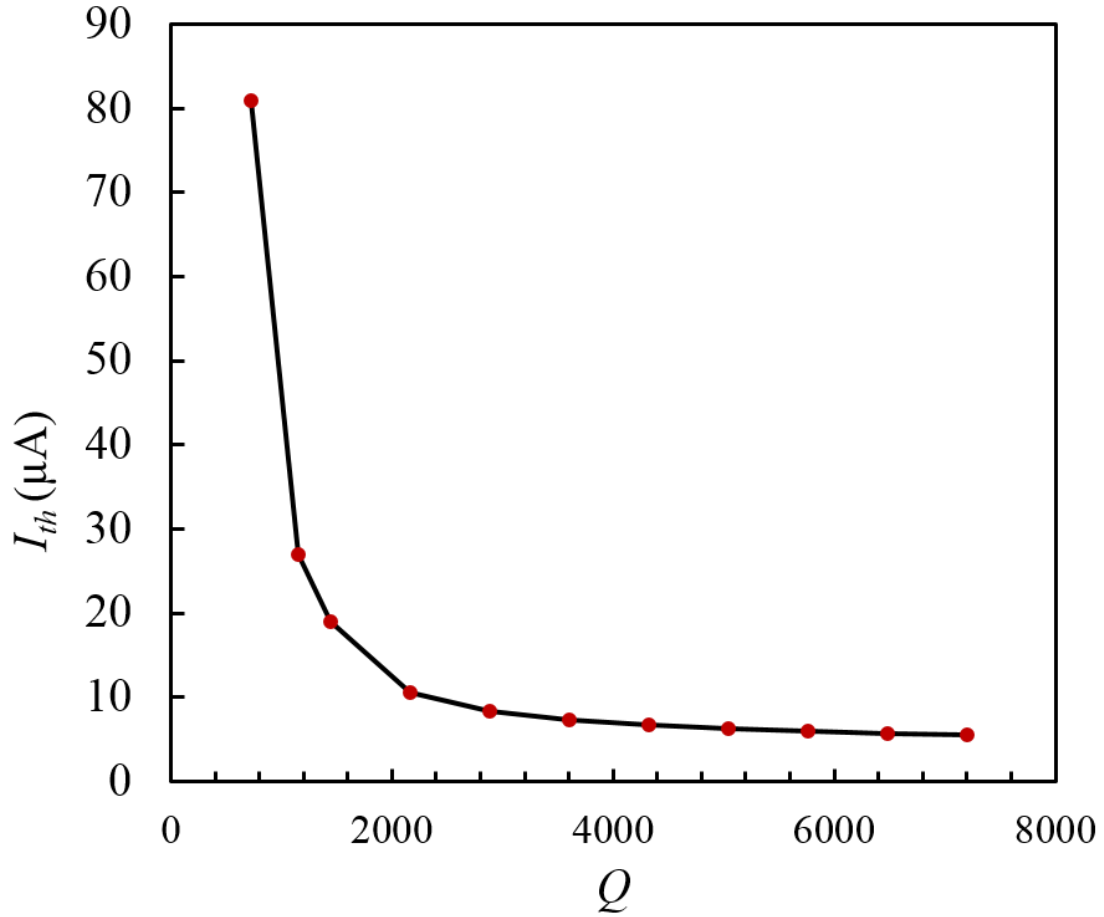


図 3.1: I_{th} の Q 値依存性[6]

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 $20 \mu\text{A}$ 、光子寿命 τ_{ph} を 2 ps ($Q \sim 2900$) 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_r は

$$f_r = \frac{1}{2(t_2 - t_1)} \quad (3.9)$$

で記述され、 t_1 と t_2 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。

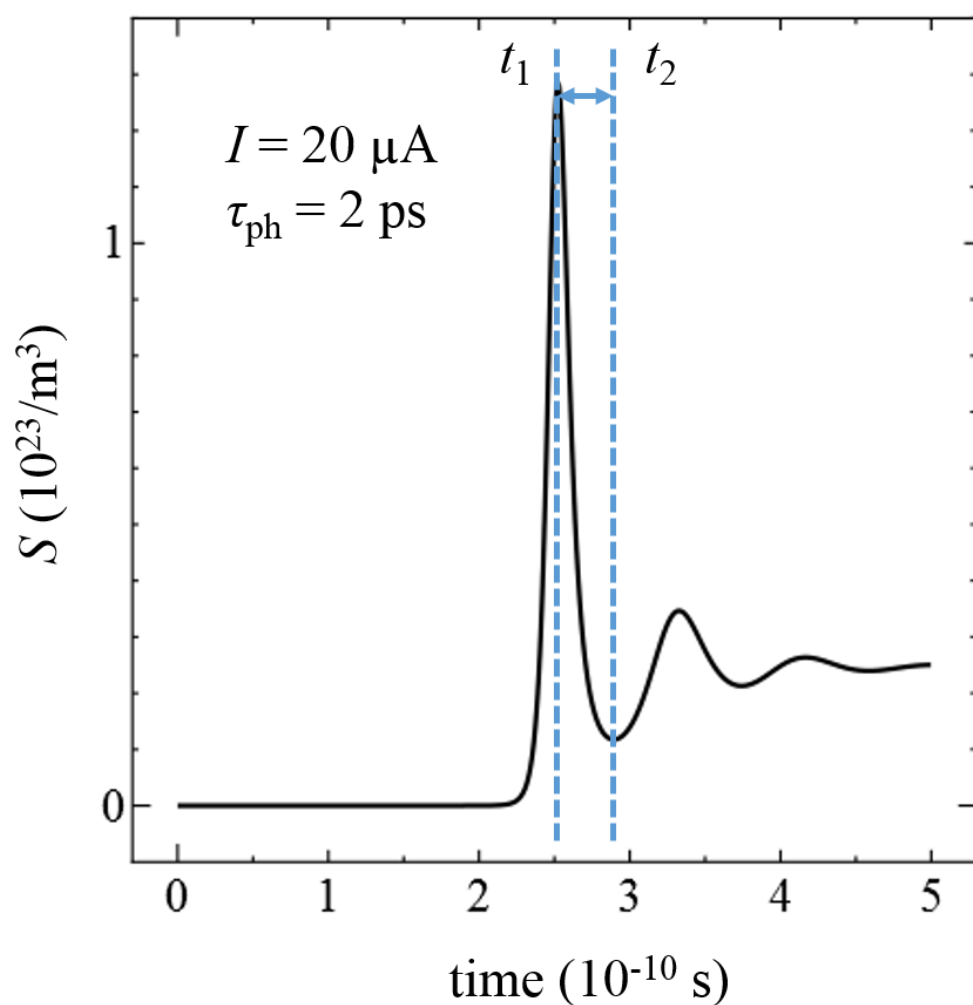


図 3.2: 光子密度 S の時間応答特性

図 3.3 は緩和振動周波数 f_r 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 $400\ \mu\text{A}$ のとき、 f_r が $39.5\ \text{GHz}$ 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しめることになる考えると、ダンピング効果が強く、 $f_{3\text{dB}}$ は f_r と同等になると予想される。ただし、 $f_{3\text{dB}}$ が $35\ \text{GHz}$ 以下でも $50\ \text{Gbps}$ の変調速度に達した報告があるため[102]、CirD レーザは $50\ \text{Gbps}$ の速度で直接変調できると期待される。

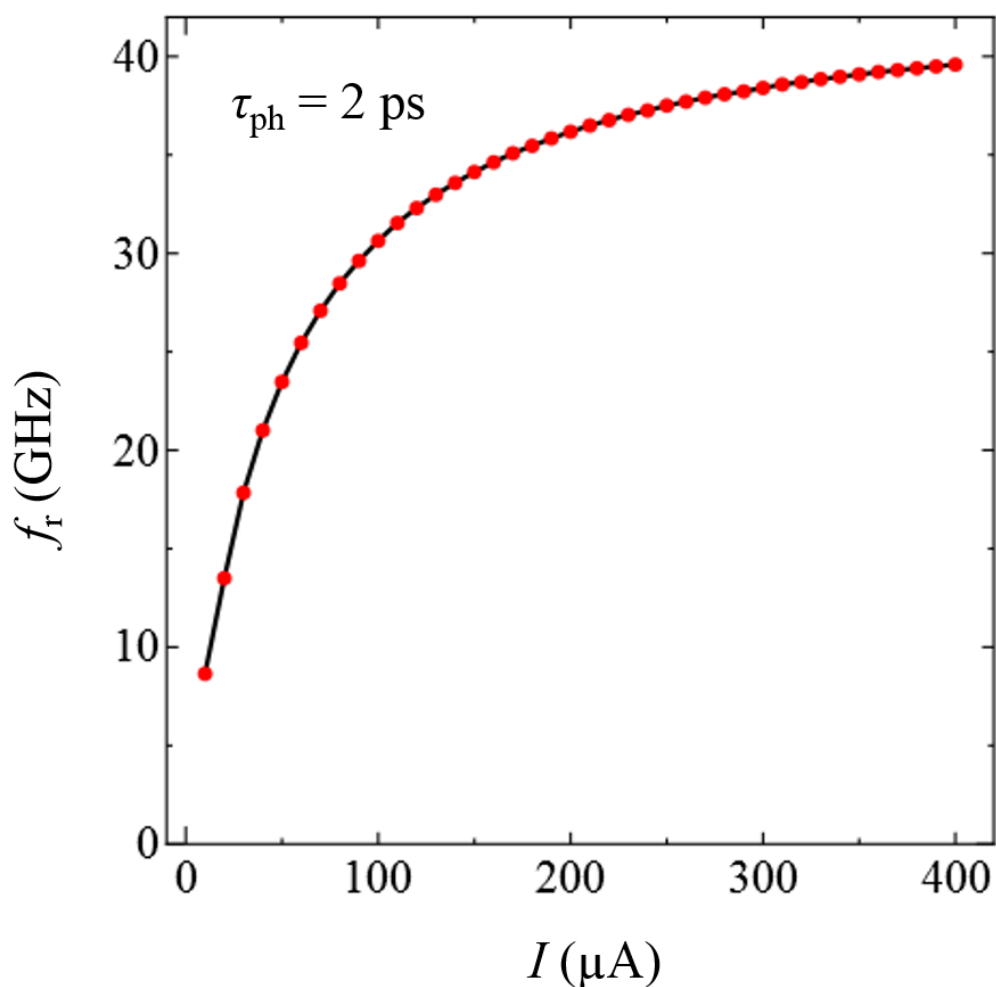


図 3.3: 緩和振動周波数 f_r と注入電流 I の関係[6]

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 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ と磁界 $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ の関係は、Maxwell 方程式によって、

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

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

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、 $\varepsilon(\mathbf{r})$ は比誘電率である。

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

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

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

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、

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

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 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta m = 20 \text{ nm}$ に、時間ステップ $\Delta t = 3.5 \times 10^{-17} \text{ s}$ 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 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 、磁界 $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ を式 (3.10) (3.11) に代入すると、電界 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ の x 、 y 、 z 成分は

$$E_x(x, y, z, t) = E_x(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon(x, y, z) \Delta m} \times [H_z(x, y, z) - H_z(x, y - \Delta y, z) - H_y(x, y, z) + H_y(x, y, z - \Delta z)] \quad (3.15)$$

$$E_y(x, y, z, t) = E_y(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon(x, y, z) \Delta m} \times [H_x(x, y, z) - H_x(x, y, z - \Delta z) - H_z(x, y, z) + H_z(x - \Delta x, y, z)] \quad (3.16)$$

$$E_z(x, y, z, t) = E_z(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon(x, y, z) \Delta m} \times [H_y(x, y, z) - H_y(x - \Delta x, y, z) - H_x(x, y, z) + H_x(x, y - \Delta y, z)] \quad (3.17)$$

となる。また、磁界 $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ の x 、 y 、 z 成分は

$$H_x(x, y, z, t) = H_x(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta m} \times [E_z(x, y + \Delta y, z) - E_z(x, y, z) - E_y(x, y, z + \Delta z) + E_y(x, y, z)] \quad (3.18)$$

$$H_y(x, y, z, t) = H_y(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta m} \times [E_x(x, y, z + \Delta z) - E_x(x, y, z) - E_z(x + \Delta x, y, z) + E_z(x, y, z)] \quad (3.19)$$

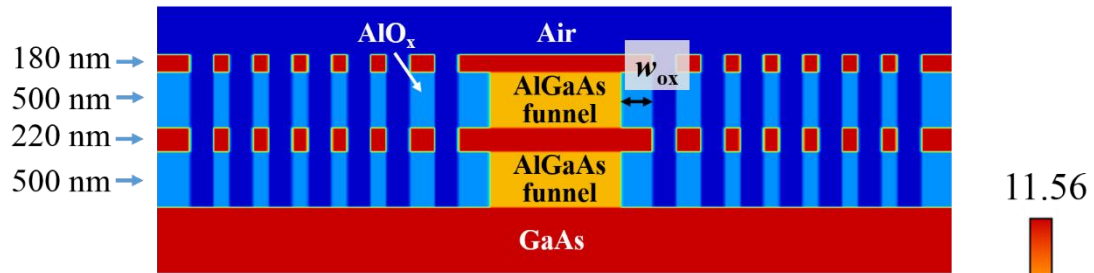
$$H_z(x, y, z, t) = H_z(x, y, z, t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta m} \times [E_x(x + \Delta x, y, z) - E_x(x, y, z) - E_z(x, y + \Delta y, z) + E_z(x, y, z)] \quad (3.20)$$

で与えられる。

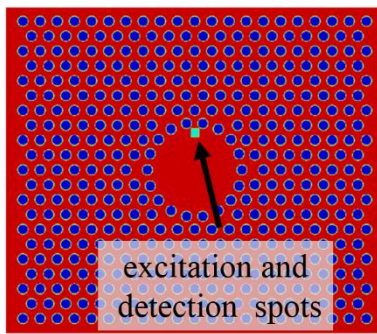
3.3.2 円形欠陥共振器の理論特性

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 w_{ox} 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



(b) top view of core layer



(c) top view of cladding layer

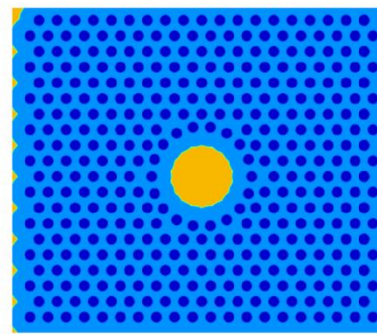


図 3.4: 解析に用いた円形欠陥共振器の概略図

表 3.2: 計算に用いた材料の屈折率

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

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。

$$H_z(x, y, z, t) = H_z(x, y, z, t) + \sum_m \sin(\omega_m t) \quad (3.21)$$

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。

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} \quad (3.22)$$

共振器の励起時間は $0 \sim 6000\Delta t$ に設定した。0 から $75000\Delta t$ 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。

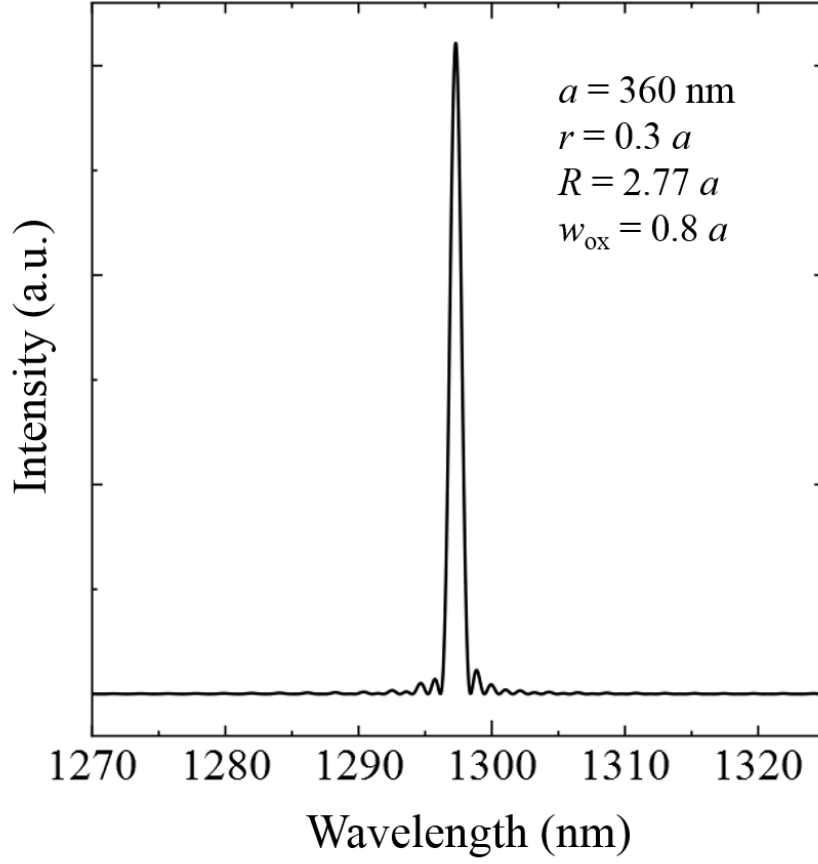


図 3.5: 磁界スペクトル

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、

$$U(t) = U(0) \exp\left(-\frac{\omega t}{Q}\right) \quad (3.23)$$

で与えられる[89]。図 3.6 は $6000\Delta t$ から $75000\Delta t$ 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 $30000\Delta t$ から $75000\Delta t$ の範囲で行った。

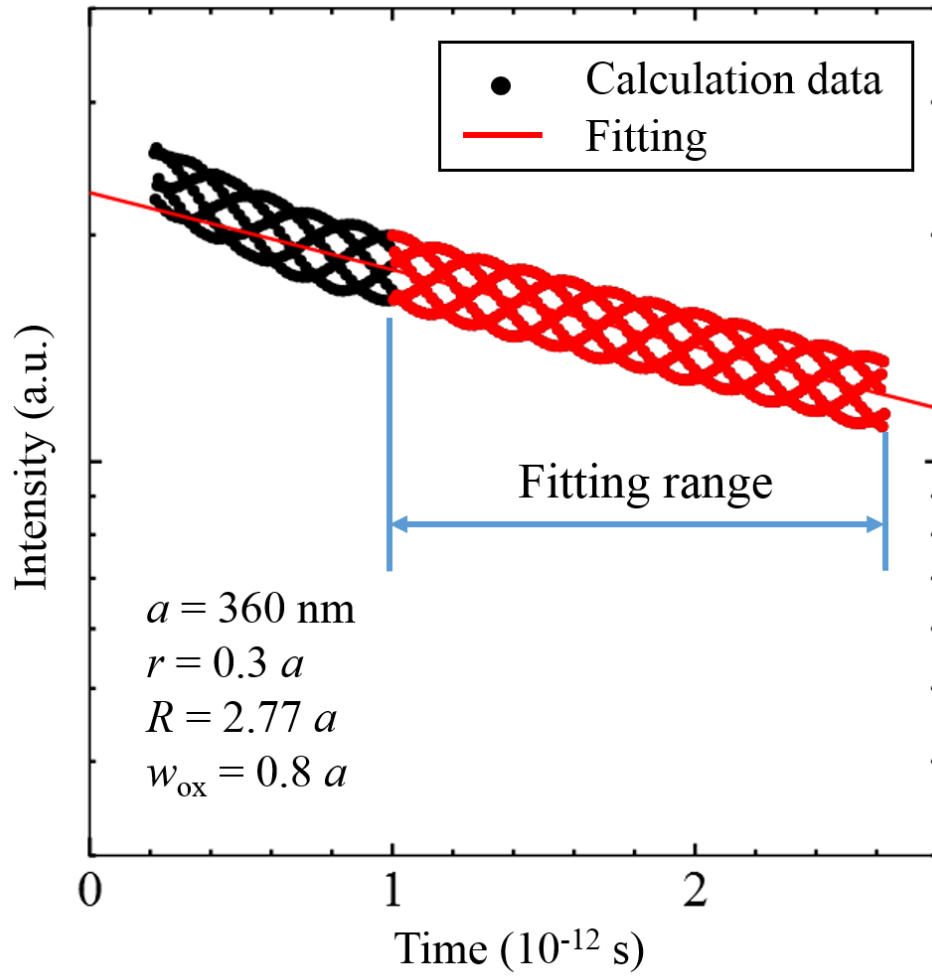


図 3.6: 初期値を与えた後のエネルギー U の時間変化

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、 $w_{\text{ox}} = 0.6 a$ のとき約 $4.95 \text{ nm}/0.01 a$ であり、 $w_{\text{ox}} = 1.2 a$ のとき約 $4.59 \text{ nm}/0.01 a$ 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。 $w_{\text{ox}} = 1.2 a$ 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。

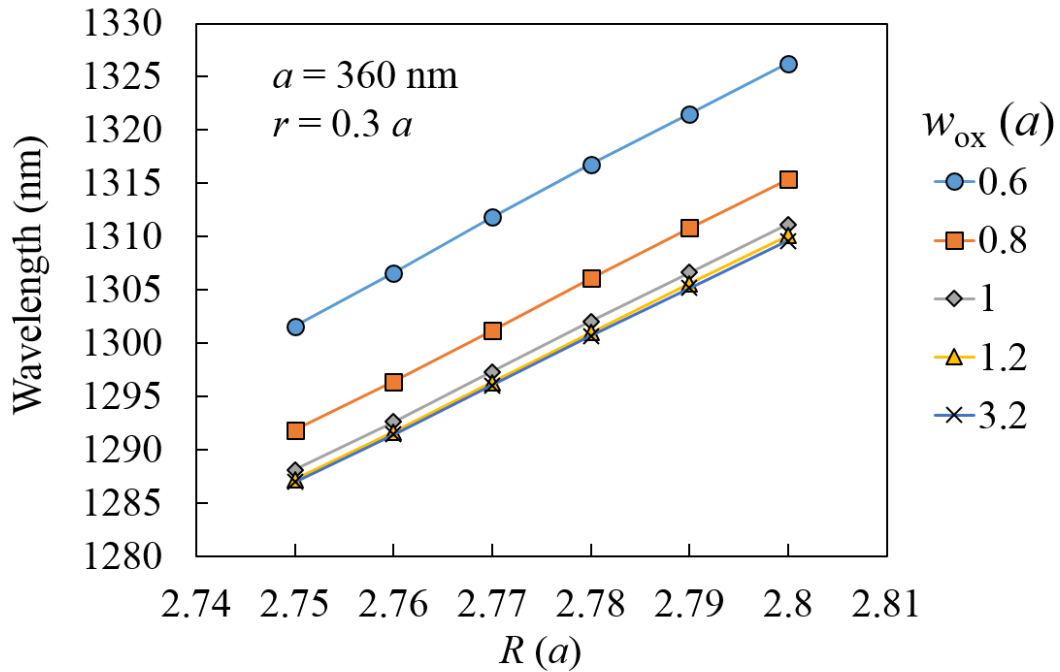


図 3.7: 異なる酸化幅 w_{ox} における共振器半径 R に対する WGM 共振波長 λ の依存性

図 3.8 は異なる酸化幅 w_{ox} 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 と 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 w_{ox} の影響が波長の場合より複雑となっている。 w_{ox} 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、 $R = 2.77 a$ のとき、 Q の増加率が 382% になり、 w_{ox} による影響が最も大きい。 w_{ox} 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。 w_{ox} が $1.2 a$ から $3.2 a$ (すべての AlGaAs が AlO_x になる) 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 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 w_{ox} は $0.8 a$ 付近であると考えられる。 $w_{\text{ox}} = 0.8 a$ 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。

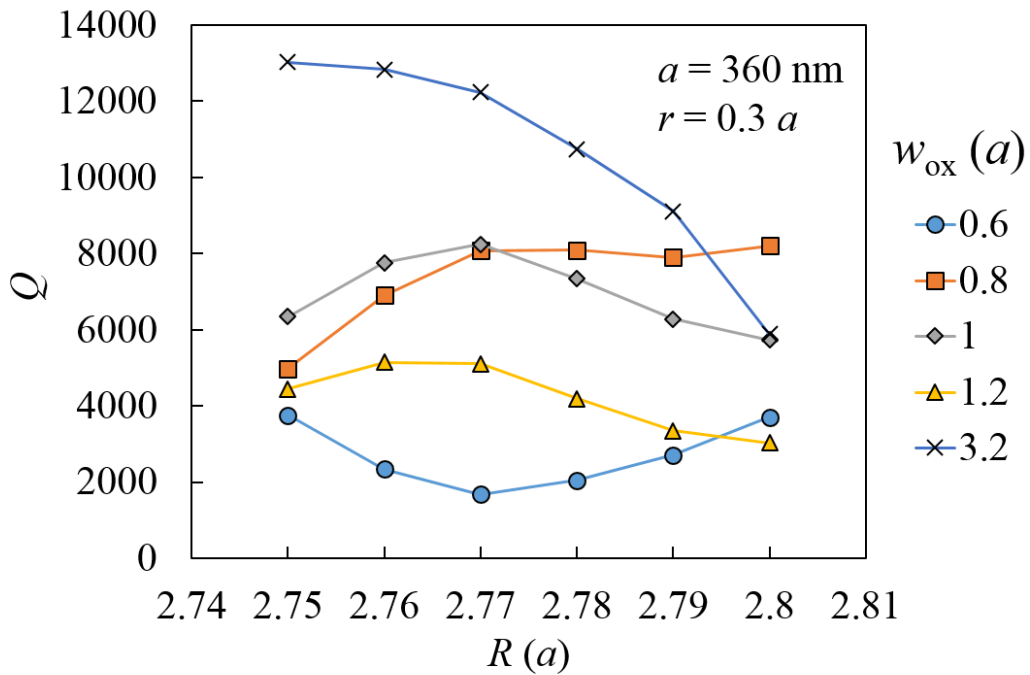


図 3.8: 異なる酸化幅 w_{ox} における共振器半径 R に対する Q 値の依存性

b) 格子定数の影響

図 3.9 (a) と (b) はそれぞれ λ と Q に対する a の影響を示す。 w_{ox} と r はそれぞれ $0.78a$ 、 $0.32a$ 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 $d\lambda/da = \sim 14.9 \text{ nm} / 5 \text{ nm}$ である。一方、すべての R に対して、 $a = 355 \text{ nm}$ の Q は最も大きいことがわかる。

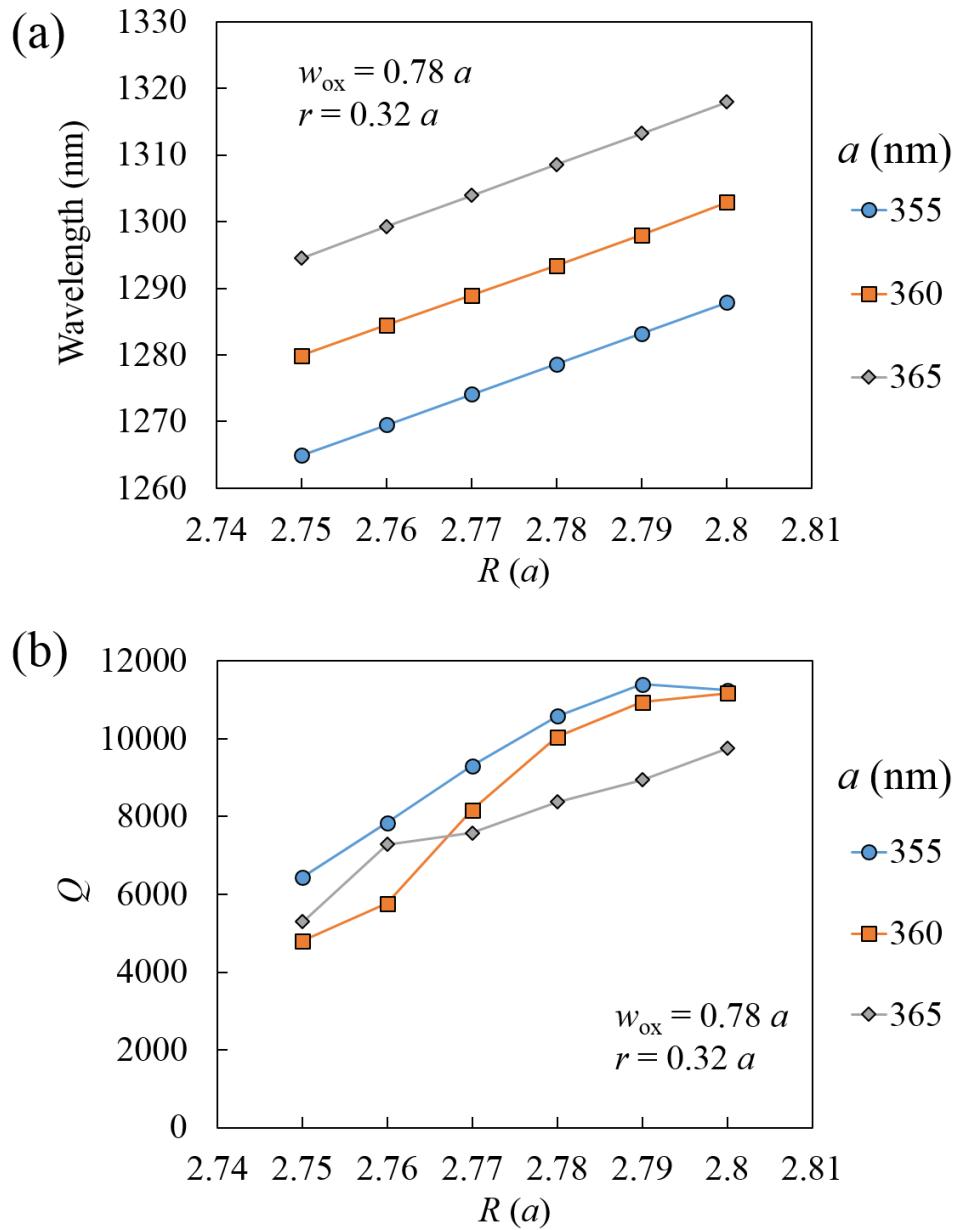


図 3.9: 格子定数による影響 (a) WGM 共振波長と (b) Q 値

c) 空孔半径の影響

図 3.10 (a) と (b) はそれぞれ λ と Q に対する r の影響を示す。 a と 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 $d\lambda/dr = \sim 12.8 \text{ nm} / 0.02 a$ である。一方、 $R = 2.75 a \sim 2.80 a$ 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。

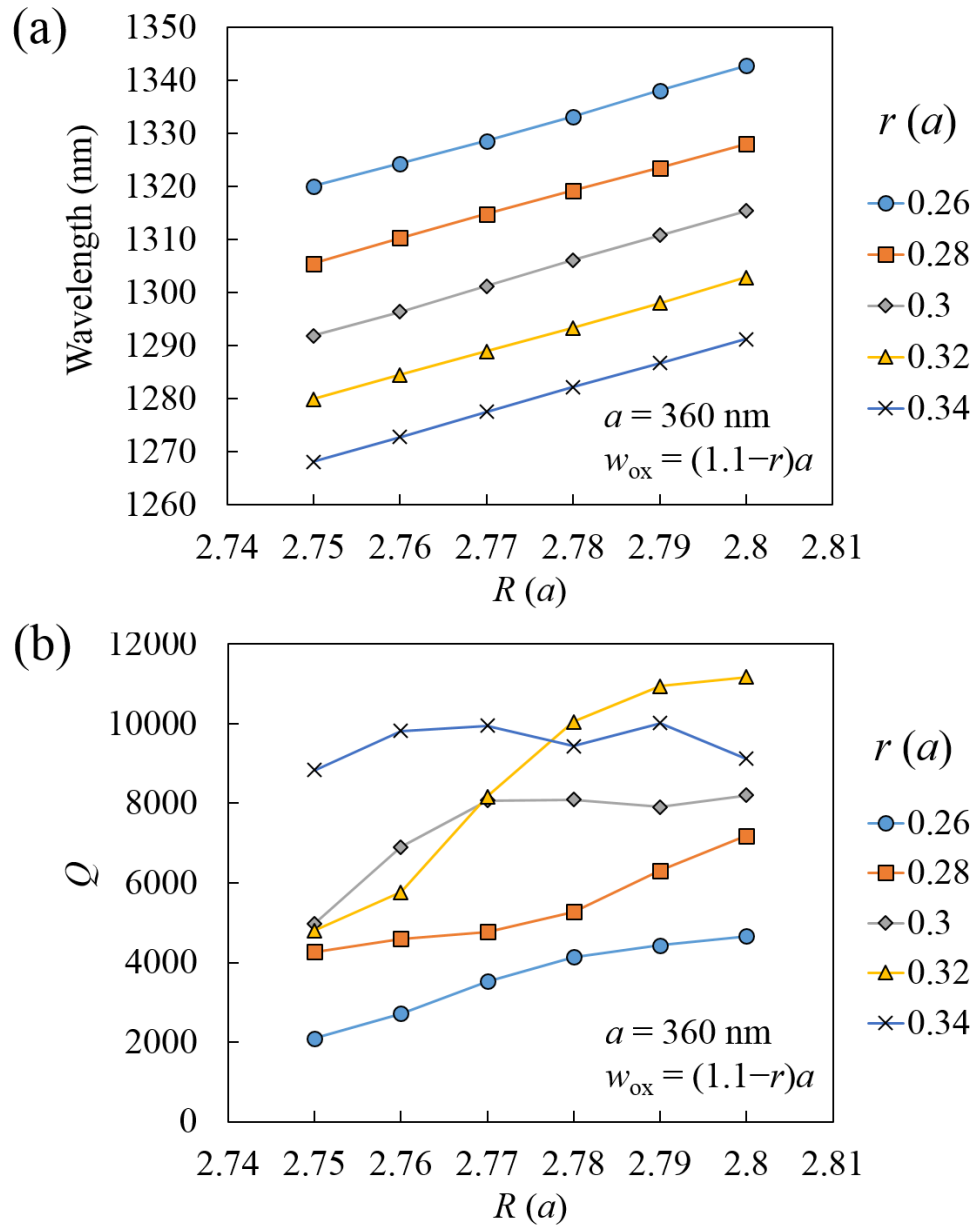


図 3.10: 空孔半径による影響 (a) WGM 共振波長と (b) Q 値

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 InCl_3 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。

$$VR = \frac{D_1}{D_2} \quad (3.24)$$

D_1 と D_2 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。

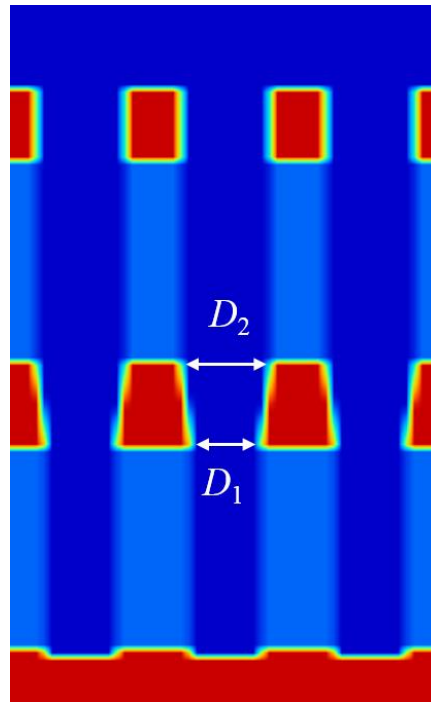


図 3.11: エッチングでテーパー状になった空孔の概略図

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 $d\lambda/dr = 5 \text{ nm}/5\%$ である。 $R = 2.75 a \sim 2.80 a$ 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、 $R = 2.75 a \sim 2.80 a$ 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。

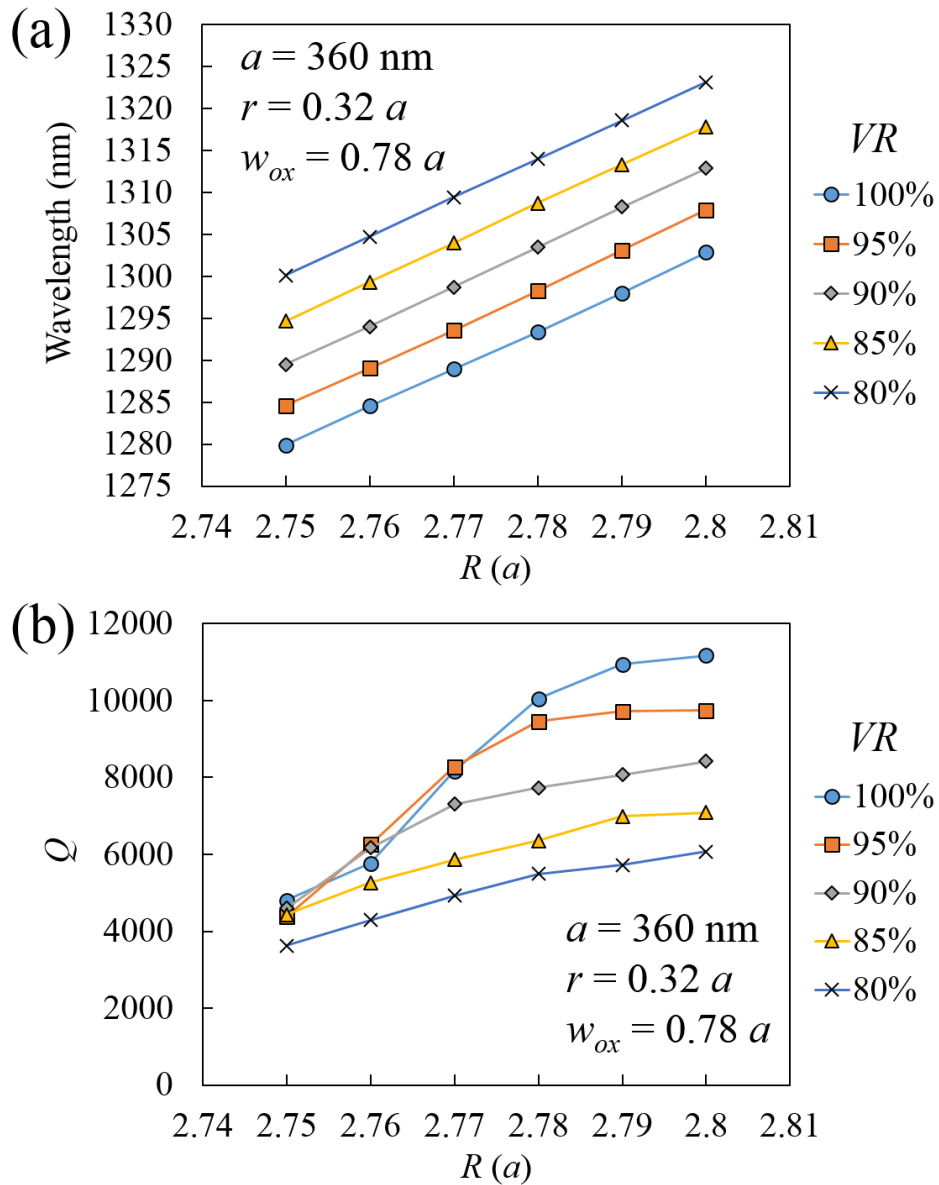


図 3.12: 空孔縮小による影響 (a) WGM 共振波長と (b) Q 値

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 $2.80a$ 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一になった。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。

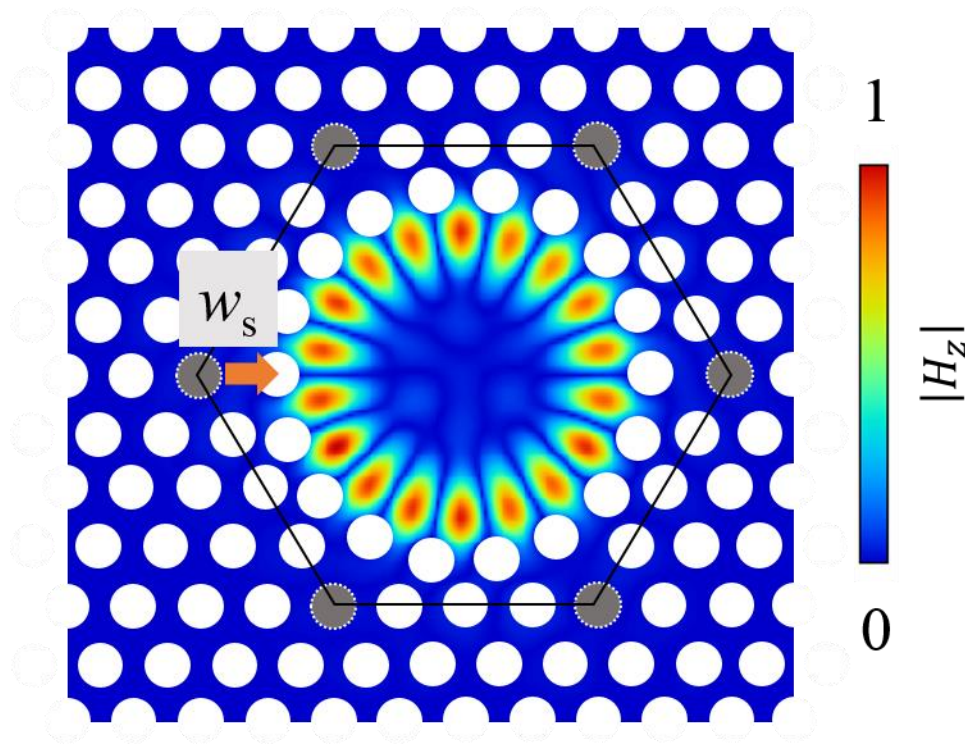


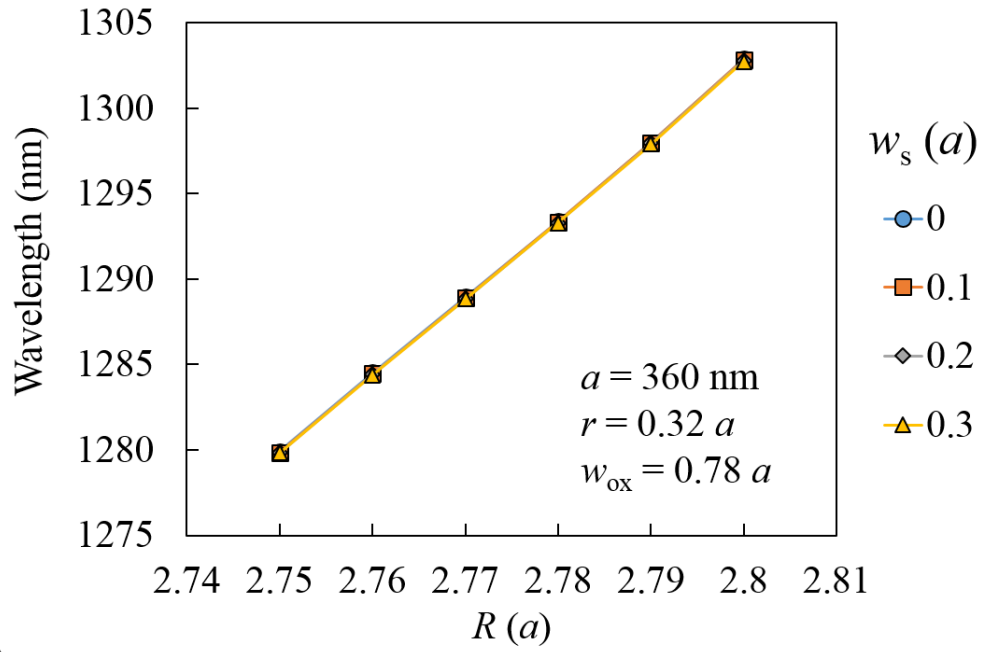
図 3.13: WGM と空孔との位置関係図

図 3.14 は六角形の頂点にある六個の空孔のシフト量 w_s と WGM の共振波長 λ 及び Q 値の関係を示している。 a 、 r 、と w_{ox} 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。

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

パラメータ	記号	値
格子定数	a	360 nm
空孔半径	r	$0.32 a$
共振器半径	R	$2.75 \sim 2.80 a$
酸化幅	w_{ox}	$0.78 a$
空孔シフト量	w_s	$0.1 a$

(a)



(b)

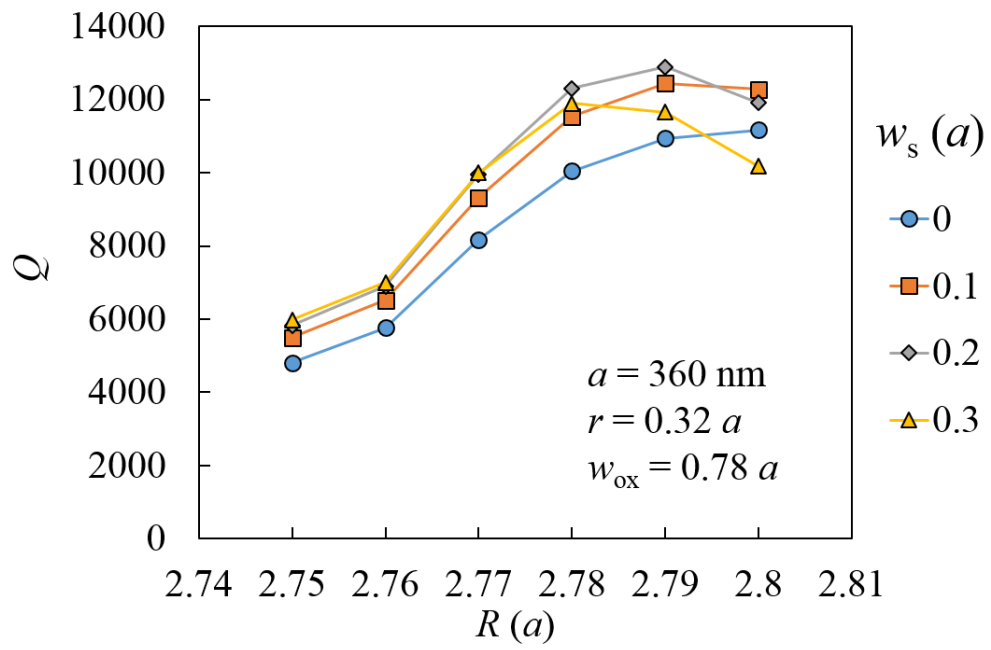


図 3.14: 空孔シフト w_s による影響 (a) WGM 共振波長と (b) Q 値

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]。

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

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。

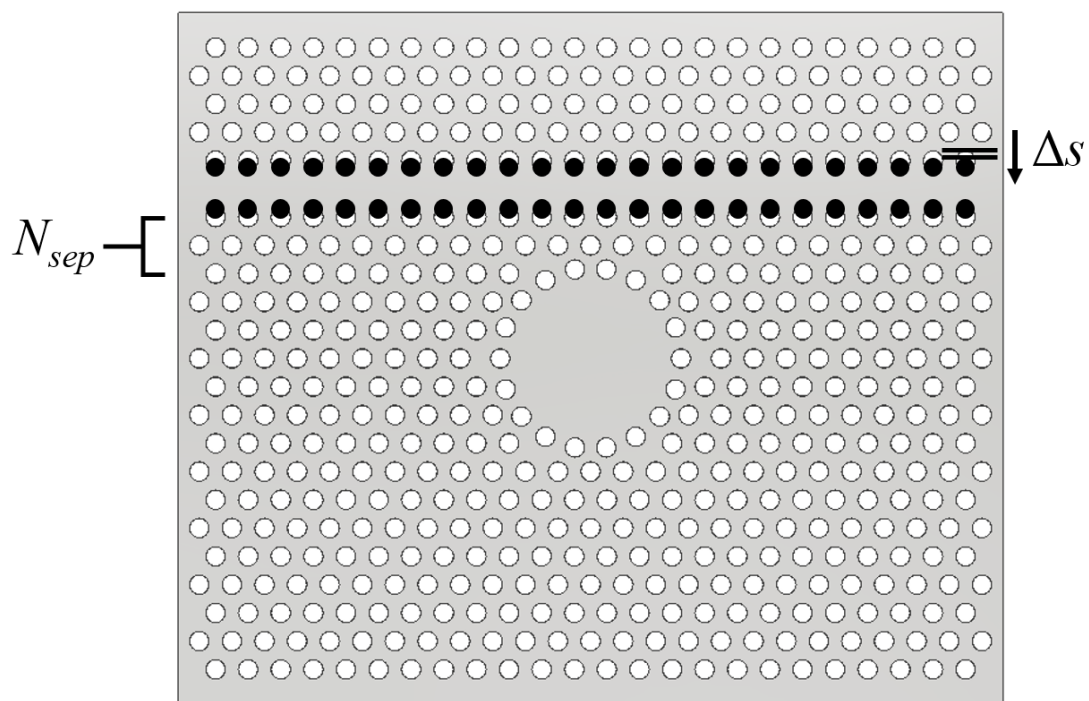


図 3.15: 導波路両側の空孔をシフトさせる模式図

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]。

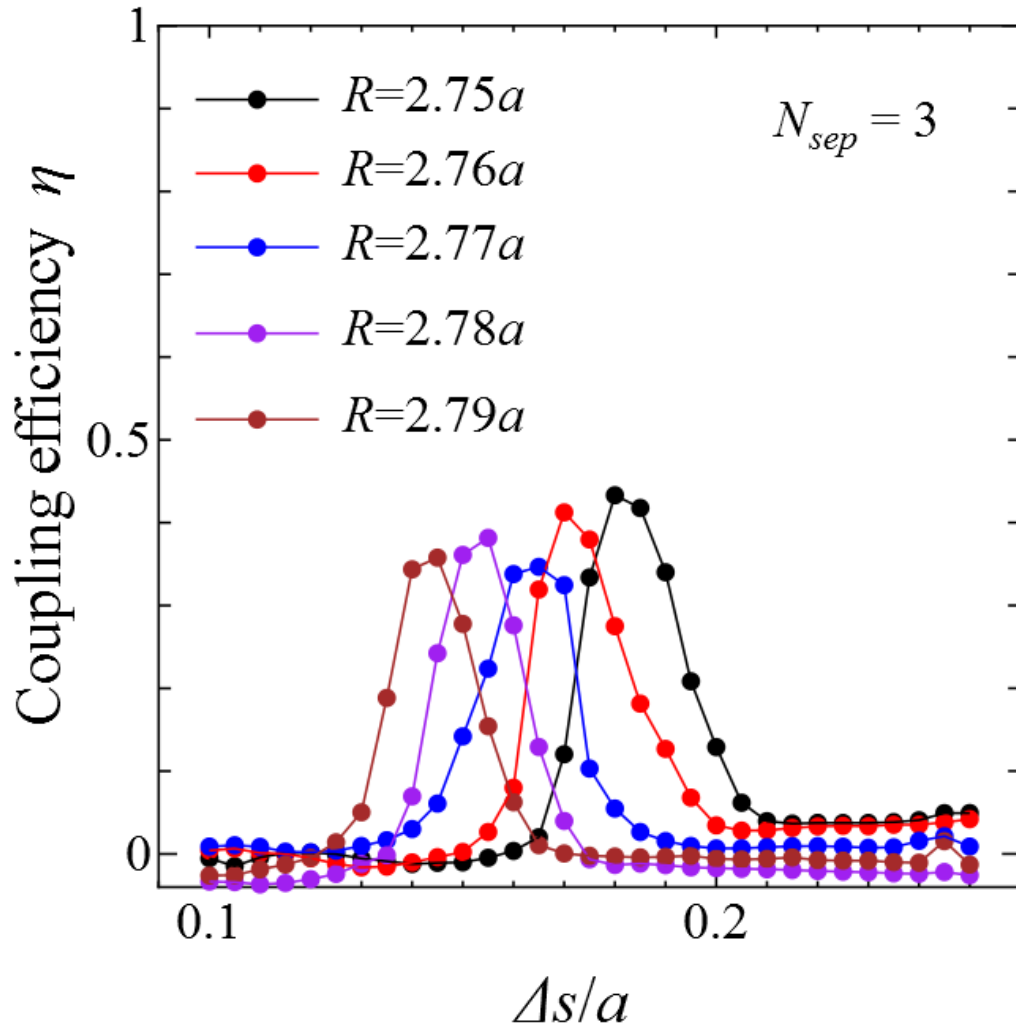


図 3.16: 異なる半径の共振器において、 Δs と結合効率 η の関係[89]

© 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次元フォトリソ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

リソグラフィ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。リソグラフィは2つのタイプに分類できる。1つは、フォ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またはUVリソグラフィと呼ばれている。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リソグラフィと呼ぶ。光リソグラフィに比べ、EBリソグラフィは、解像度が高いので、微細パターンを容易に得られるが、パターンを一つ一つ描画するため大量生産に向かないという欠点がある。本研究ではフォトリソニック結晶パターンを形成するには、EBリソグラフィを用いた。EBリソグラフィの工程を図4.1に示す。以下で各手順について説明する。

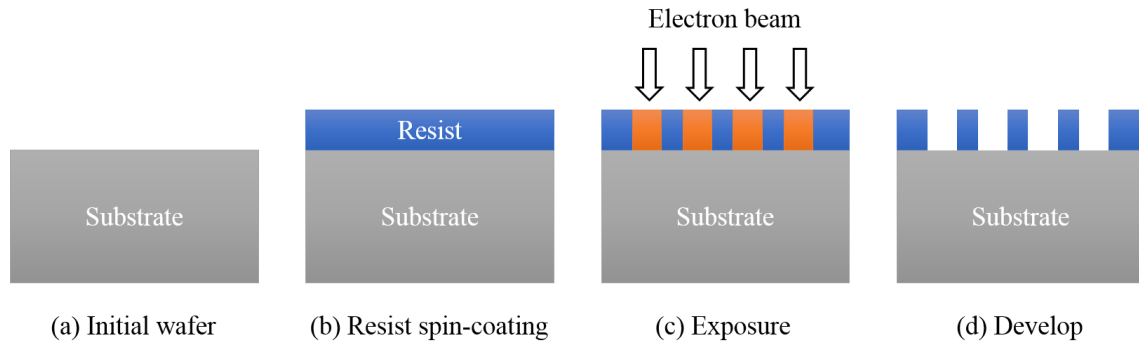


図 4.1: EB リソグラフィ工程の模式図

まず、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、スピナ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ナーの回転数と関係し、スピナ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、プリバークを行う。その後、EB リソグラフィ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

フォトリソグラフィ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 D_e と関連する。ドーズ量 D_e は、電子の照射時間 T_e 、ビーム電流 I_e 、と分解能 A_e で決まる。これらの変数は、式 (4.1) に示す関係を持つ。

$$D_e = \frac{I_e \times T_e}{A_e^2} \quad (4.1)$$

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

$$A_e = \frac{F_e}{N_e} \quad (4.2)$$

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 であるのに対して 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、フォトリソグラフィ結晶構造の場合、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_e 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 ($F_e = 100 \mu\text{m}$ 、 $N_e = 20000$) であるのに対して、ELS-100T は 0.078 nm ($F_e = 75 \mu\text{m}$ 、 $N_e = 960000$) 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 ($F_e = 150 \mu\text{m}$ 、 $N_e = 60000$) 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章で述べるフォトリソグラフィ装置などの描画は、分解能が5 nm でも十分対応できるので、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 $60 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、ELS-100T は約 $180 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ である。

表 4.1: EB リソグラフィ装置の仕様

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

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 ($F_e = 150 \mu\text{m}$ 、 $N_e = 60000$) 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 ($F_e = 75 \mu\text{m}$ 、 $N_e = 60000$) 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 $0.06 \mu\text{s}$ であるので、照射時間 T_e を $0.05 \mu\text{s}$ に設定しても、実際に実行された照射時間は $0.05 \mu\text{s}$ ではなく、 $0.06 \mu\text{s}$ 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 ($F_e = 75 \mu\text{m}$ 、 $N_e =$

60000) で描画する際に、ビーム電流 I_e を 25 pA に設定し、照射時間 T_e を 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 $0.32a$ であり、0.12 μs と 0.13 μs の場合、空孔半径 r が約 $0.33a$ であり、0.14 μs の場合、空孔半径 r が約 $0.34a$ 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。

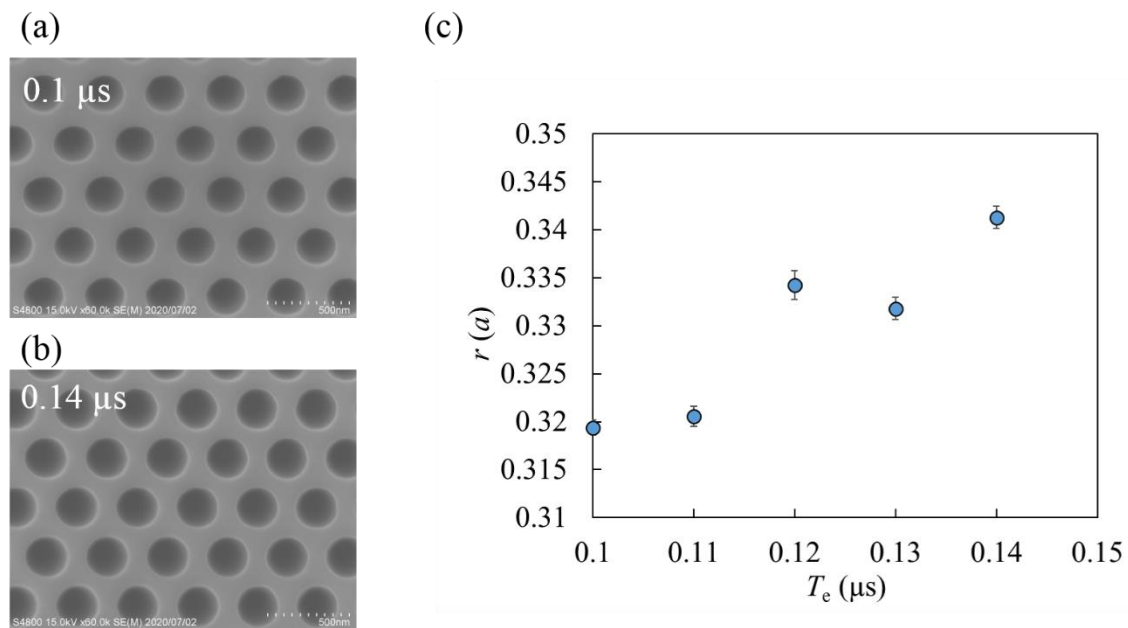


図 4.2: (a) 分解能が 1.25 nm の条件に基づいて、ドーズ時間 0.1 μs で作製したフォトニック結晶構造の上面 SEM 像、(b) 分解能が 1.25 nm の条件に基づいて、ドーズ時間 0.14 μs で作製したフォトニック結晶構造の上面 SEM 像、(c) 実測した空孔半径 r とドーズ T_e 時間の関係図 (エラーバー: 標準誤差)

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 C_B 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 V_{pp} 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。

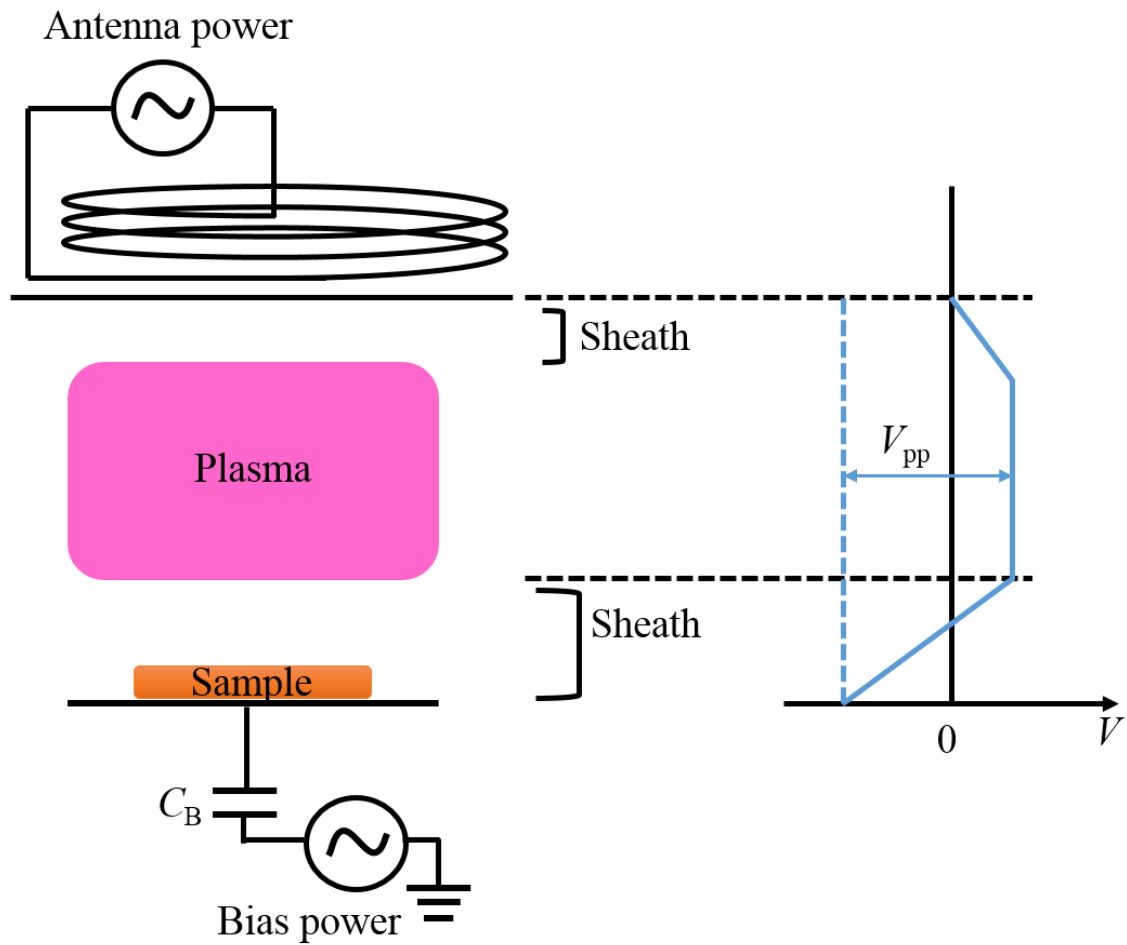


図 4.3: ICP によるドライエッチング

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、 Cl_2 がある。 Cl_2 は GaAs や AlGaAs と反応して塩化物(GaCl_3 、 AlCl_3 、 AsCl_3)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 Cl_2 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 BCl_3 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 CH_4 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 円形欠陥フォトリ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/ AlO_x 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 AlO_x 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、深掘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。

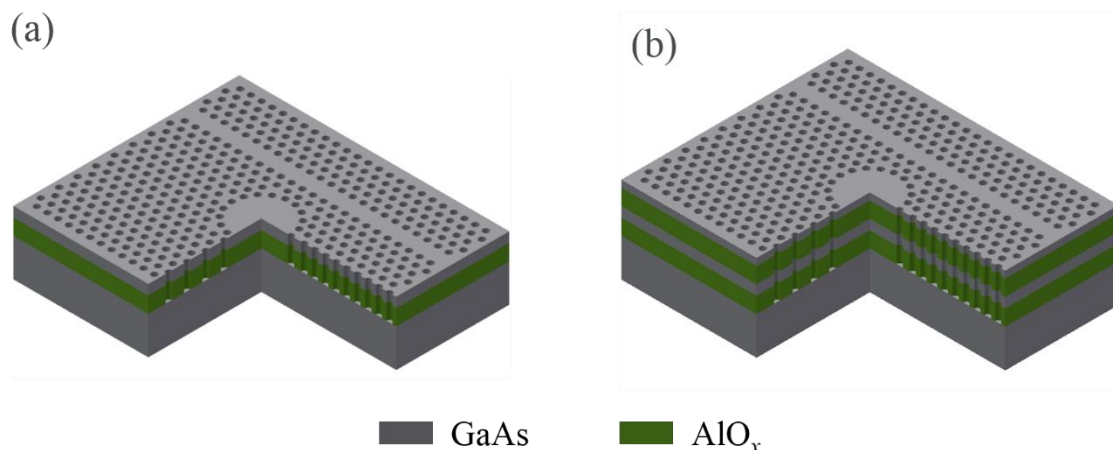


図 5.1: 光学特性評価に用いた二種類の CirD レーザの概略図 (a) air/AlO_x クラッド層構造と (b) 2 層 AlO_x クラッド層構造

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。先球フ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。

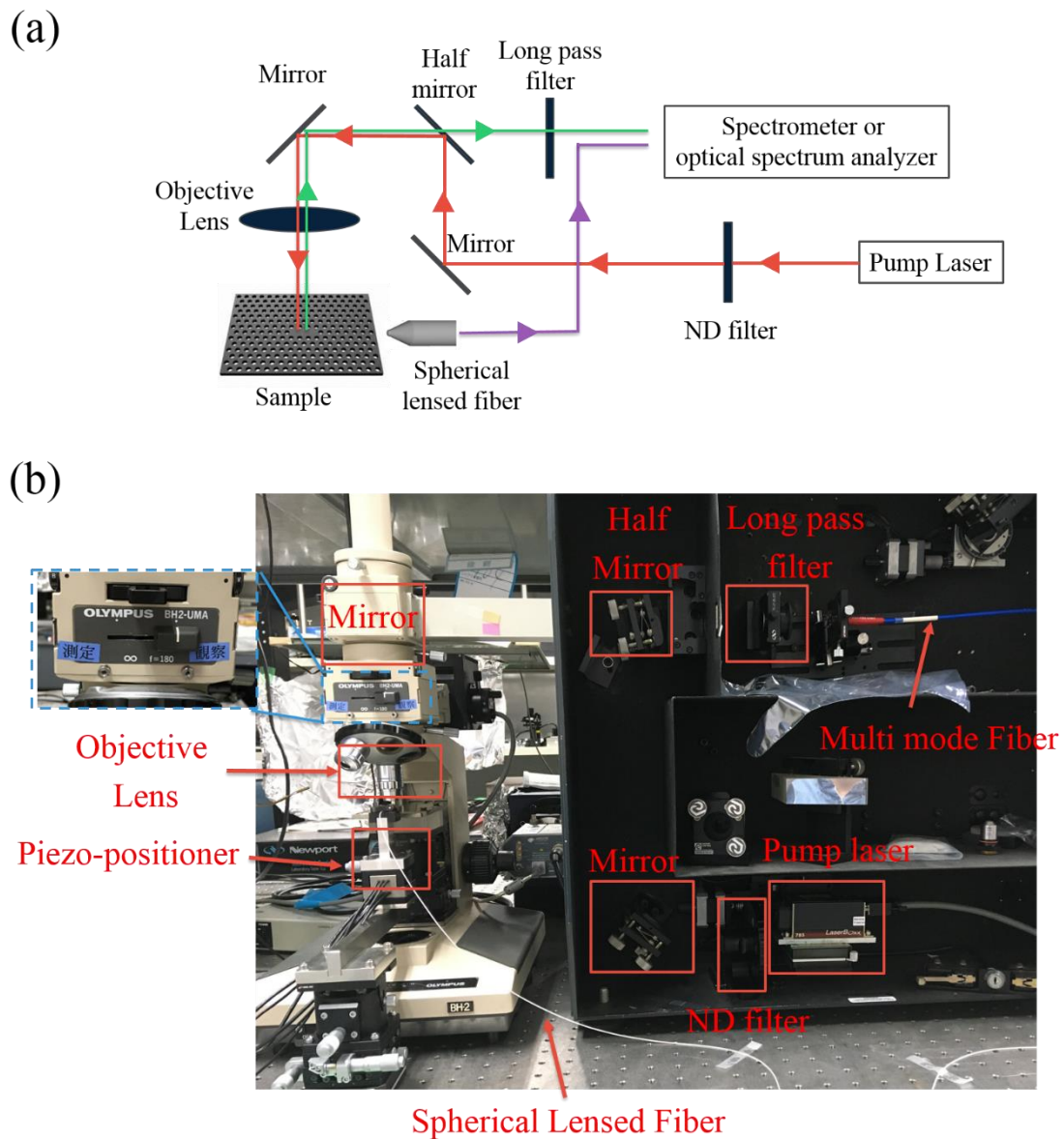


図 5.2: CirD レーザの光特性測定系の (a) 模式図と (b) 実物図

測定系には、図 5.2 (b) に示すように、観察と測定との2つのモードがある。観察モードは、図 5.3 に示すように、モニター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 $2\text{ }\mu\text{m}$ 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 $3\text{ }\mu\text{m}$ 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 ($< 1\text{ }\mu\text{m}$) が発生する恐れがある。共振器の直径が約 $2\text{ }\mu\text{m}$ であることを考慮すると、 $3\text{ }\mu\text{m}$ 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。

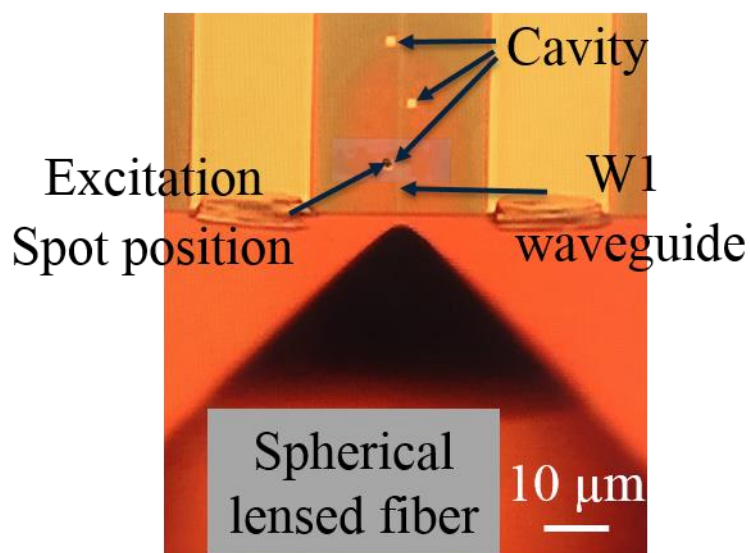


図 5.3: モニタから見た試料と先球ファイバーの様子

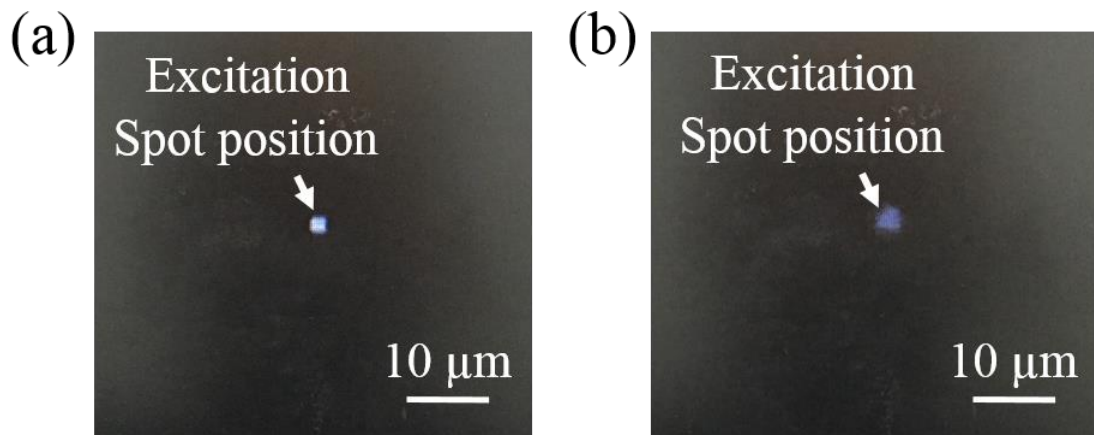


図 5.4: (a) 観察モードで焦点を合わせた状態の励起スポットの様子、(b) 観察モードから測定モードに切り替えた後の励起スポットの様子

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。

1. 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 $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$ 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。
2. 基板をエタノールで洗浄し、スピ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。スピコート後は、180°C のホットプレートに乗せ、180 秒間のプリバークを行う。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°C 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/ AlO_x 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 F_e ($\mu\text{m}\square$)	150
ドット数 N_e	60000
ビーム電流 I_e (pA)	100
ドーズ量 D_e ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	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。
- 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、 $\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$ 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。

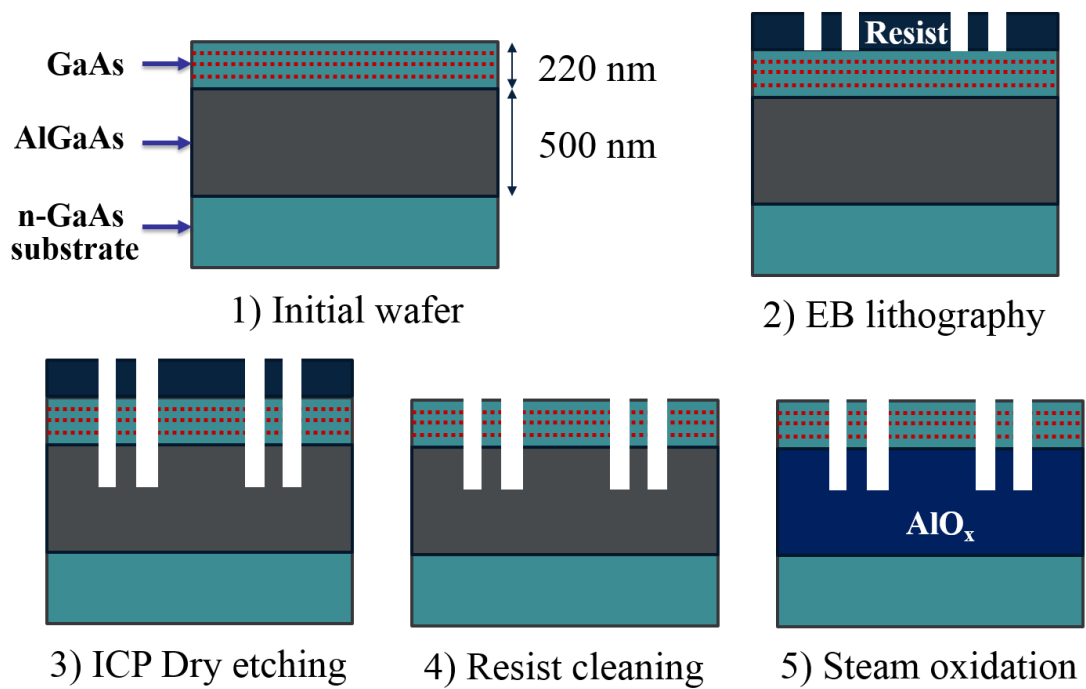


図 5.5: Air/AlO_x クラッド層 CirD レーザの作製手順

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

Cl ₂ 流量 (sccm)	12
BCl ₃ 流量 (sccm)	18
CH ₄ 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

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。

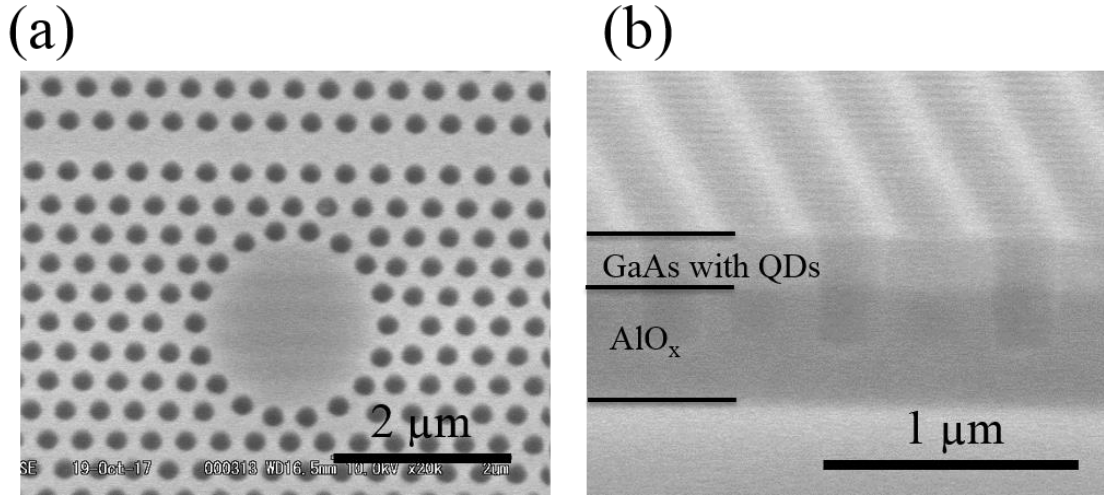


図 5.6: 作製した試料 SEM 図: (a) 上面図 (b) 俯瞰図 [6]

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見られ、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 25 μW 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 $10\,000\text{ cm}^{-1}$ 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_{eff} は約 3.5 μW である。CirD レーザの閾値電流 I_{th} は、次の式

$$P_{eff} = I_{th} \times \frac{hc}{e\lambda} \quad (5.1)$$

から、約 3.6 μA と推定され、LEAP レーザの 4.8 μA より小さい[112]。ここで、 h はプランク定数であり、 λ は 1.3 μm 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。

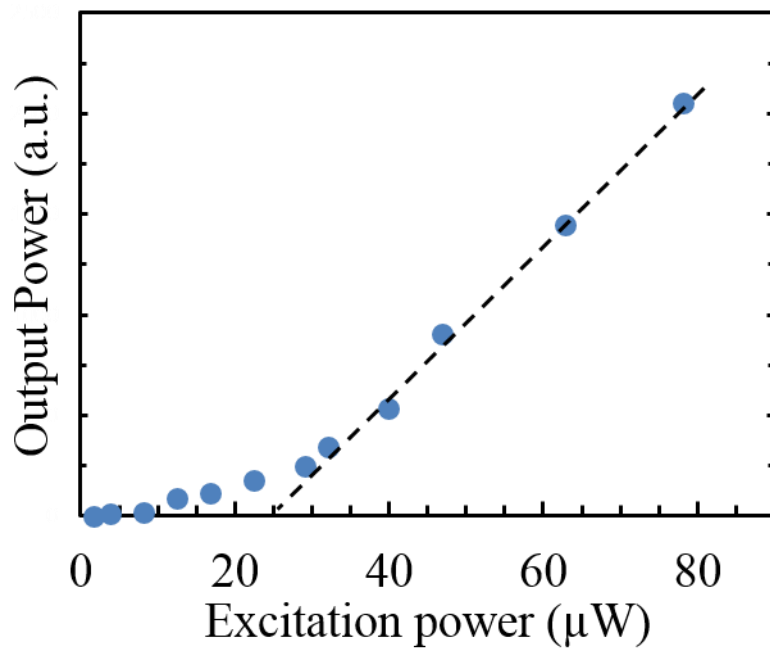


図 5.7: 出力パワーと励起光パワーの関係図

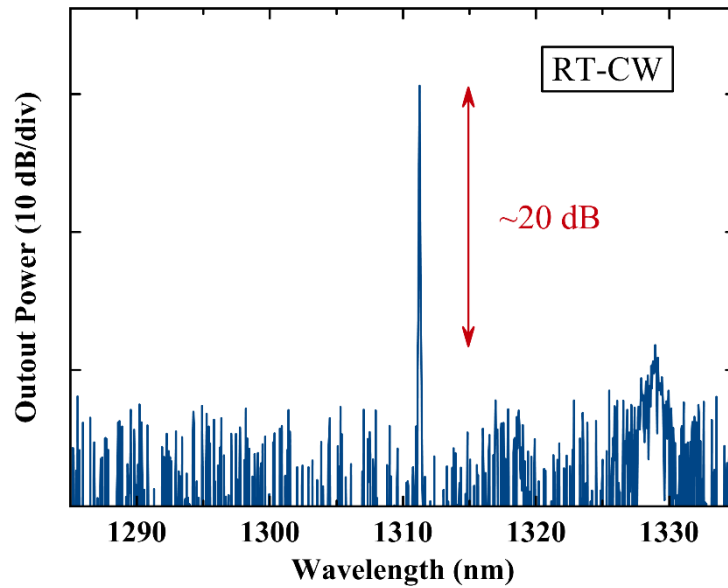


図 5.8: 断面発光スペクトル (OSA により分析) [113]

© 2018, IEEE

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。

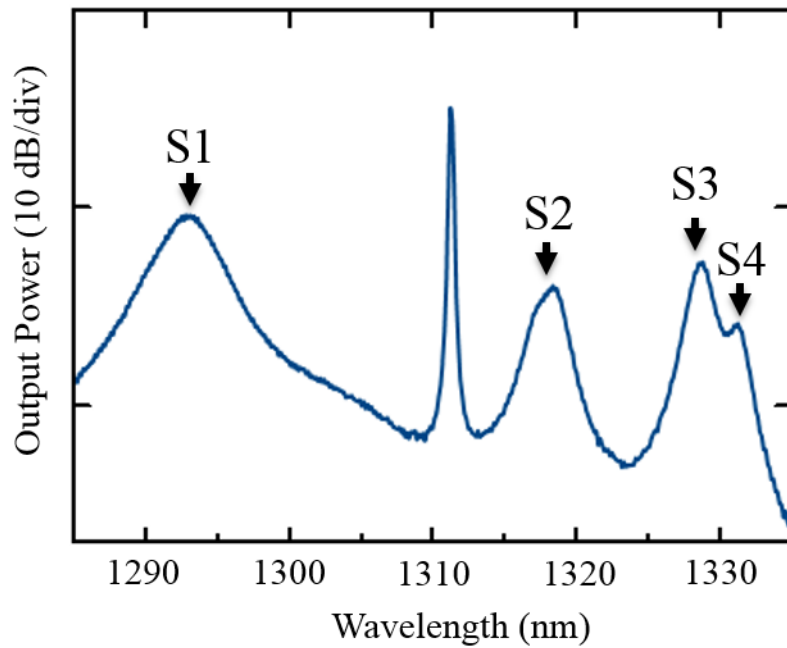


図 5.9: 垂直方向における発光スペクトル (分光器により分析) [113]

© 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 $2.75 \sim 2.80 a$ 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。

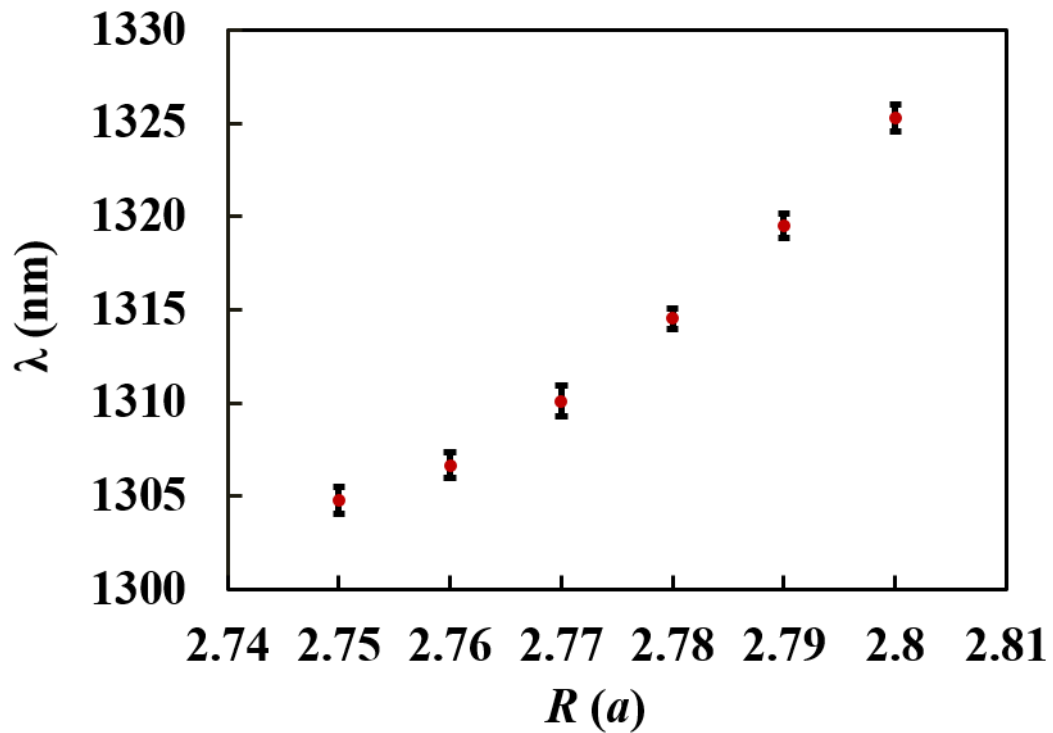


図 5.10: WGM の共振波長 λ と共振器半径 R の関係図[113]

© 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。

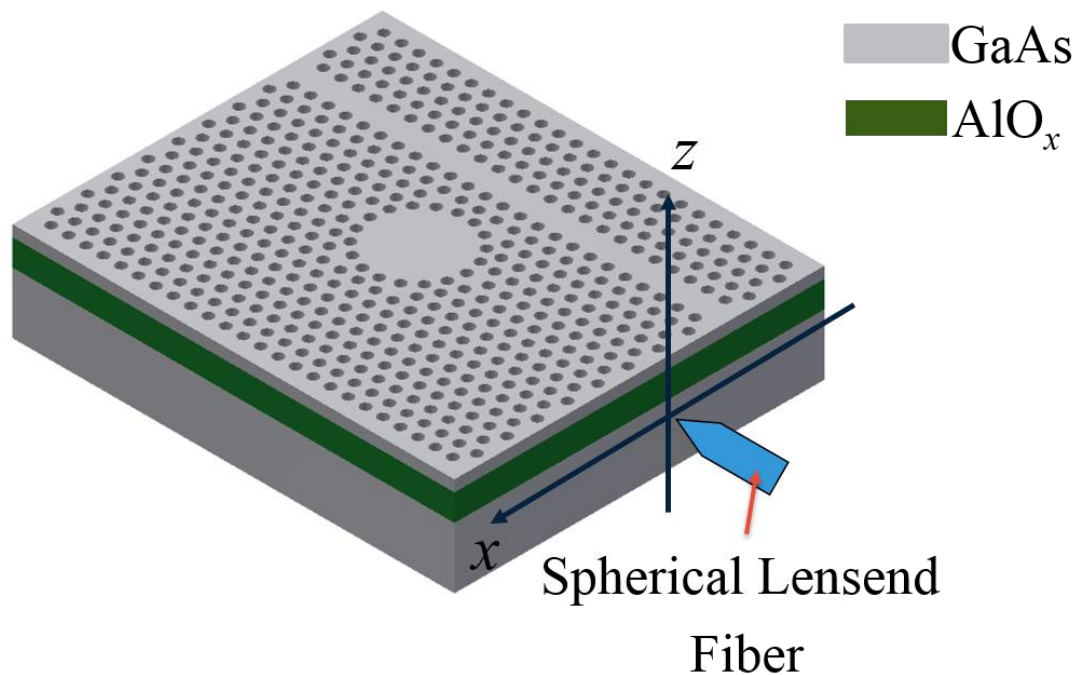


図 5.11: 先球ファイバーを用いて試料へき開断面 (xz 面) の光分布を測定する模式図

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 μm 、 z 方向のファイバー移動範囲は 11 μm 、ファイバーの移動精度は 1 μm 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 の最大の強度が得られた xz 座標をそれぞれ (x_1, z_1) 、 (x_2, z_2) とすると、 $x_1 - x_2 = 1 \mu\text{m}$ 、 $z_1 - z_2 = -2 \mu\text{m}$ となっている。

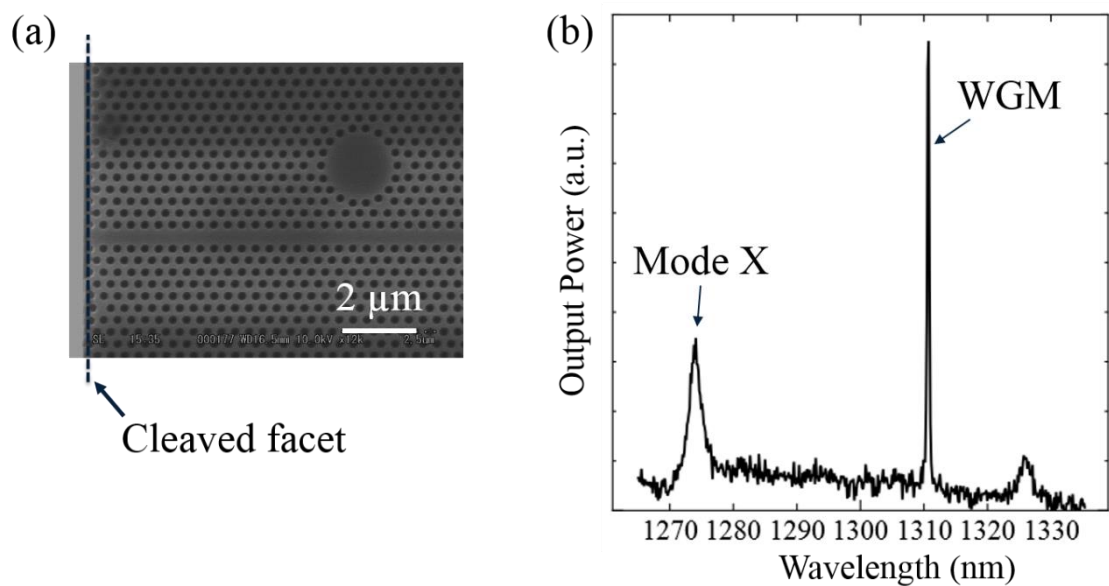


図 5.12: xz 面の 2 次元光分布測定に用いた試料の (a) 上面図、(b) ある xz 座標におけるスペクトル

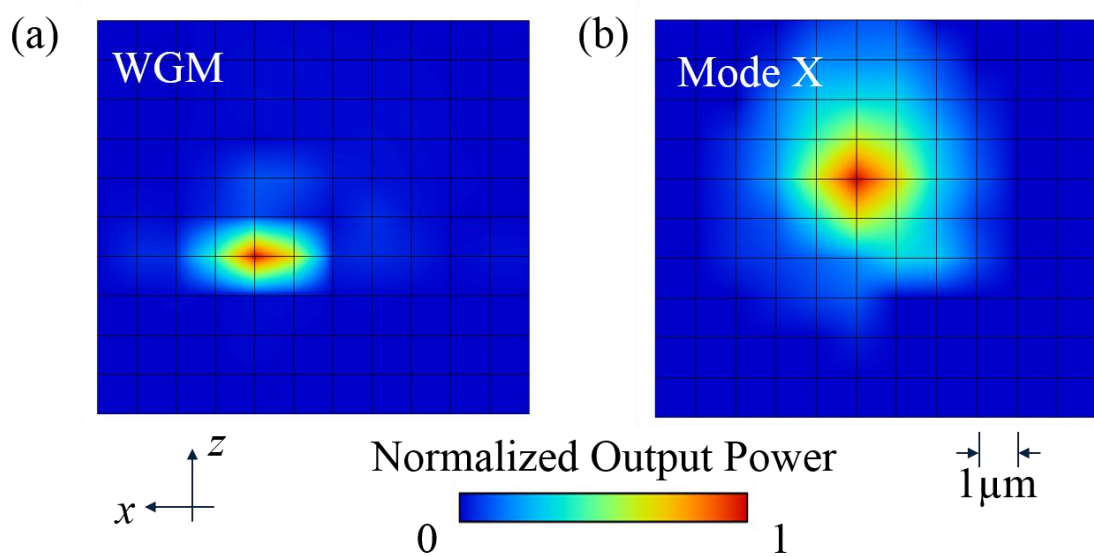


図 5.13: (a) WGM と (b) モード X の xz 面の 2 次元光強度分布

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 $3\ \mu\text{m}$ 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。

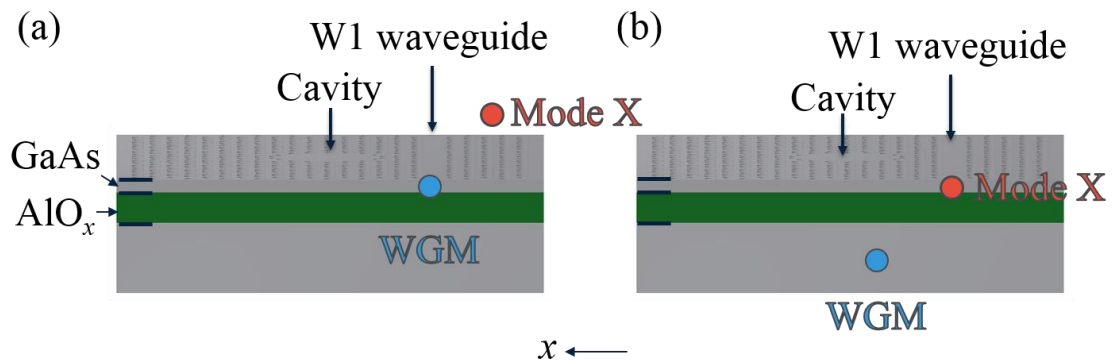


図 5.14: WGM とモード X の出射位置の模式図 (a) 可能性 1 (b) 可能性 2

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系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掘りエッチングが必要となる。表 5.3 には深掘りエッチング条件を示している。深掘りエッチングは 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、 CH_4 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 CH_4 の流量を 1 sccm に設定した。

表 5.3: 深掘りエッチングの条件

	Step 1	Step 2	Step 3
Cl_2 流量 (sccm)	12	12	12
BCl_3 流量 (sccm)	18	18	18
CH_4 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 ($^{\circ}\text{C}$)	20	20	20
エッチング時間 (s)	135	100	130

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。

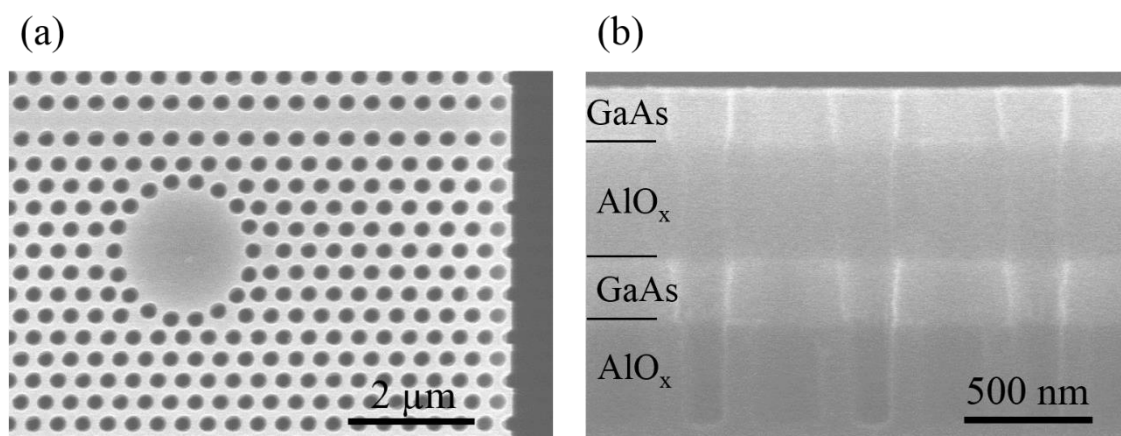


図 5.15: 作製した試料 SEM 図: (a) 上面図 (b) 断面図

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見られ、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。

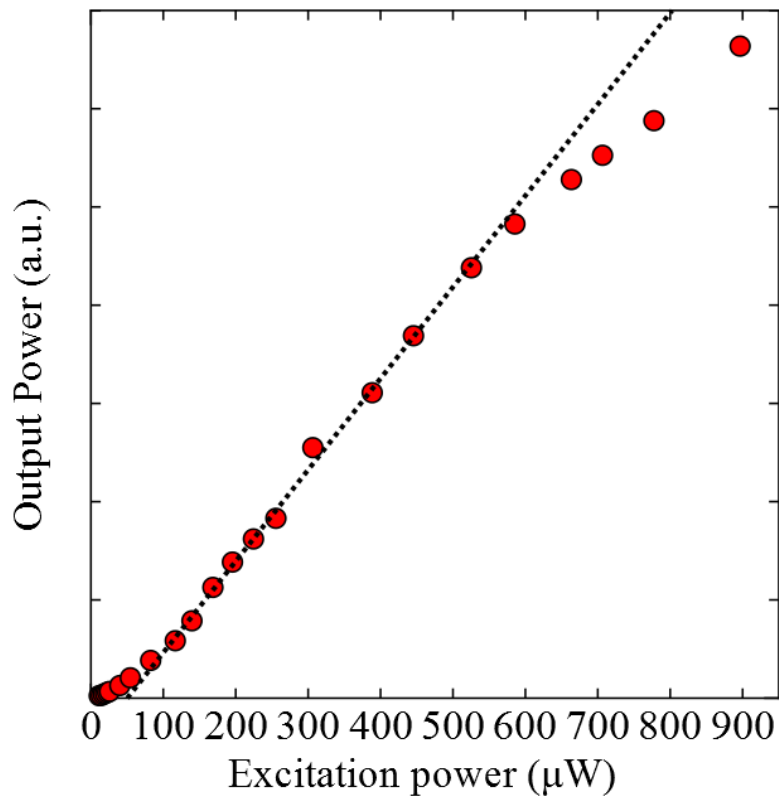


図 5.16: 出力パワーと励起光パワーの関係図

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

改善されると期待できる。

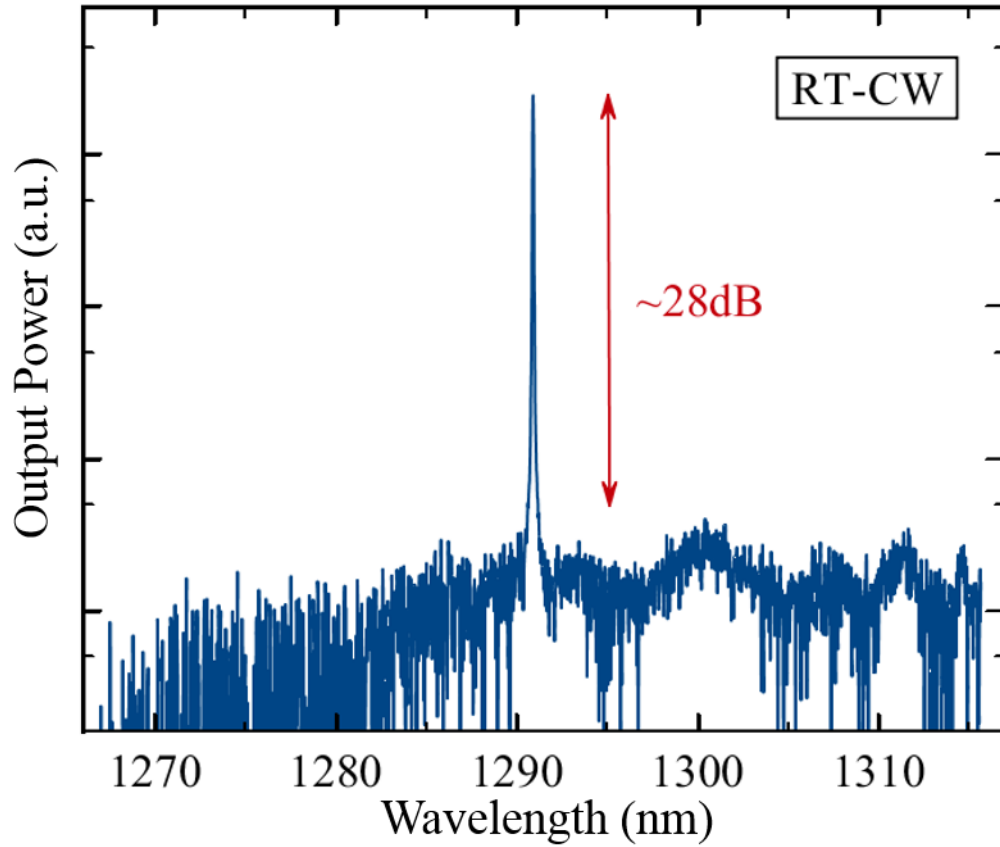


図 5.17: 断面発光スペクトル (OSA により分析)

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 $2.75 \sim 2.81 a$ 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、 $d\lambda/dR = \sim 4.66 \text{ nm}/0.01 a$ が得られ、3.3 節の FDTD 計算の結果と良く一致した。

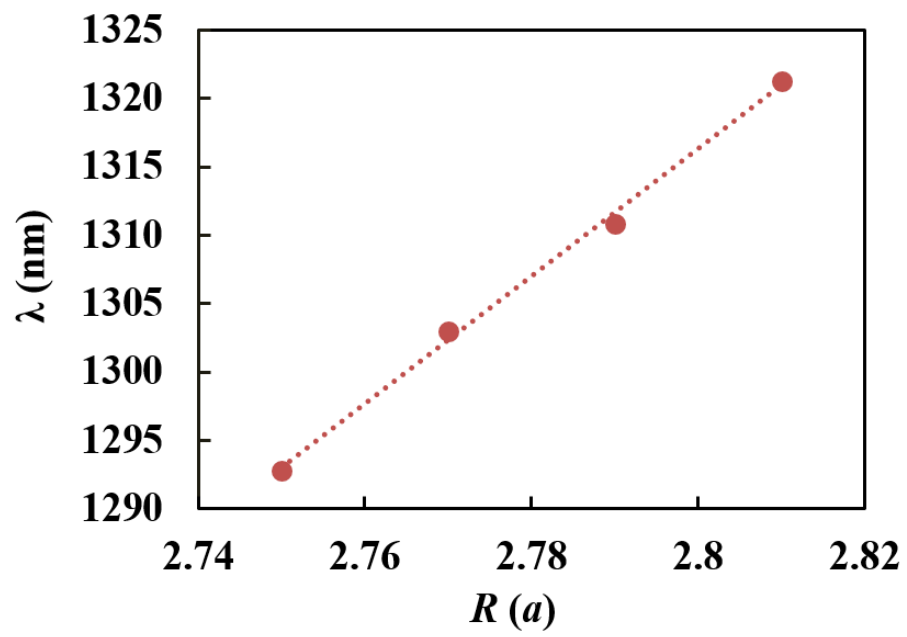


図 5.18: WGM の共振波長 λ と共振器半径 R の関係図

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氣的に絶縁される。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リソ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、 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{Ar}$ の混合ガスにおける BCl_3 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。 BCl_3 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 BCl_3 比率の Cl_2/BCl_3 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、 Cl_2/BCl_3 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、 Cl_2/BCl_3 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。

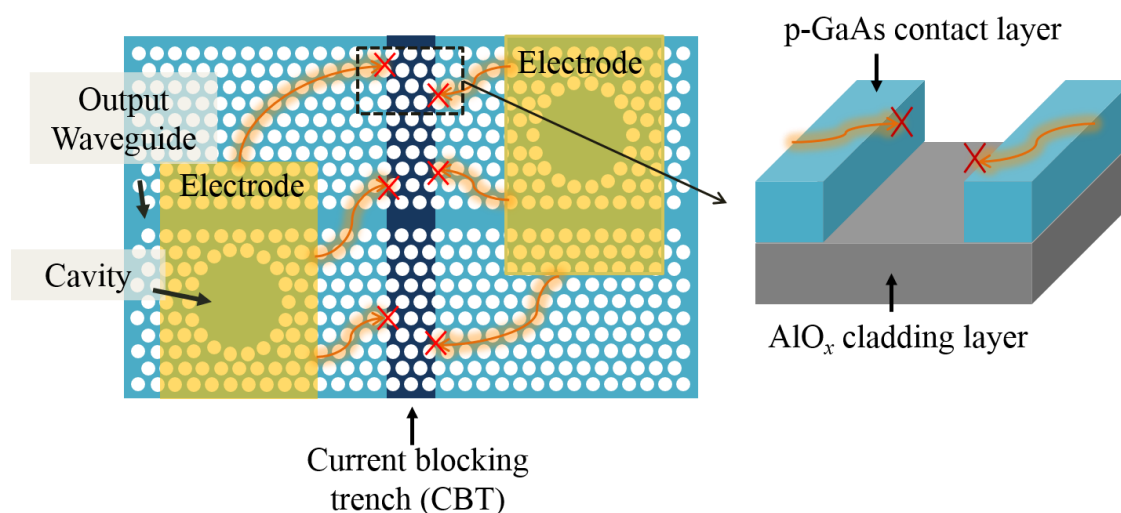


図 6.1: CirD レーザアレイにおける CBT の概略図

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 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{CH}_4$ 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。フォトリソグラフィで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/AlO_x 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 $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$ 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

まず、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。スピコート後は、 180°C 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 リソグラフィによりラインパターンを描画した。その後、 24°C

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 深堀リエッチング

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 InCl_3 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 $\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$ 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 μm 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 BCl_3 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。

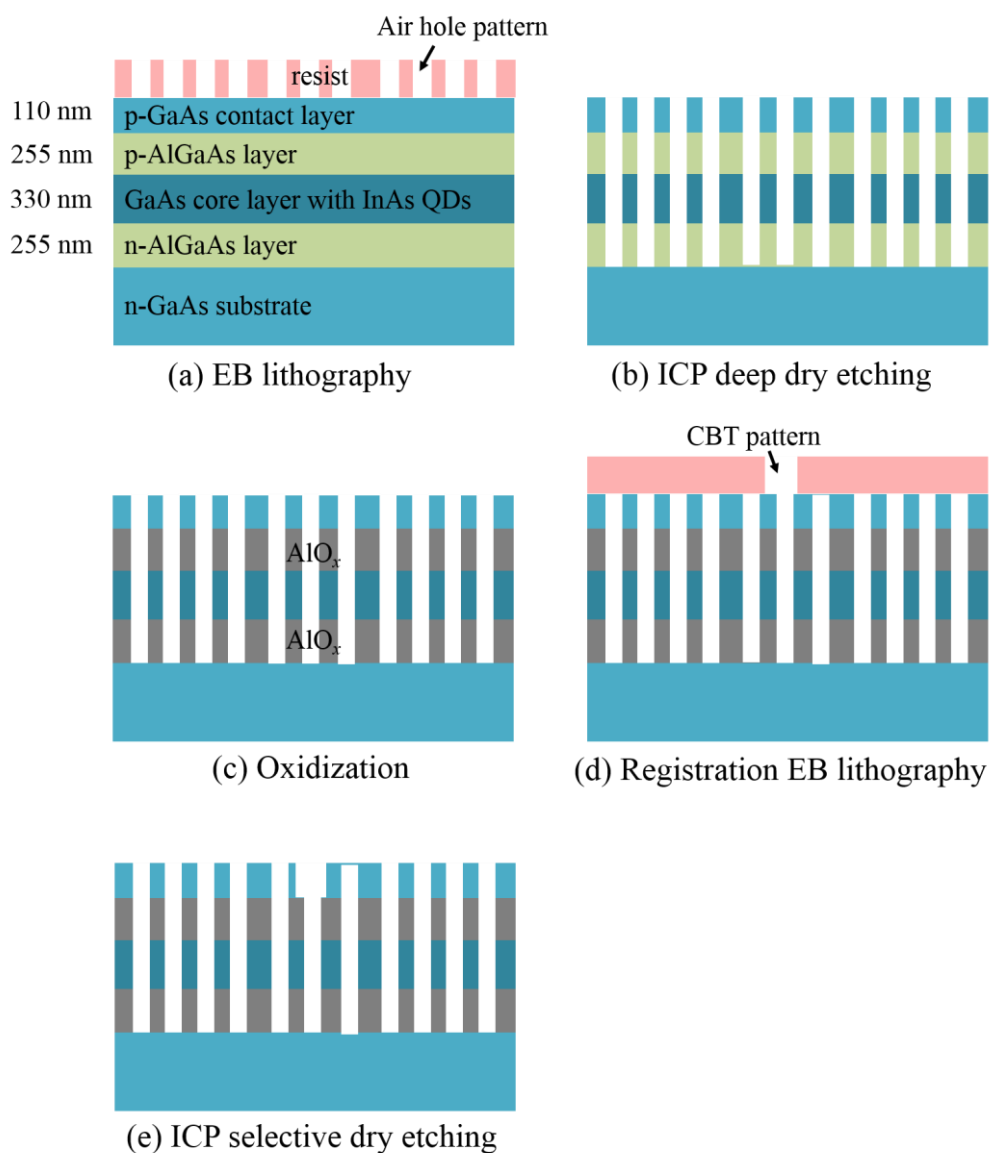


図 6.2: 平坦な GaAs/ AlO_x ヘテロ層の選択ドライエッチング実験手順

表 6.1: 多層ヘテロ基板の深堀りの条件

	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
CH ₄ 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 6.2: 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
CH ₄ 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。

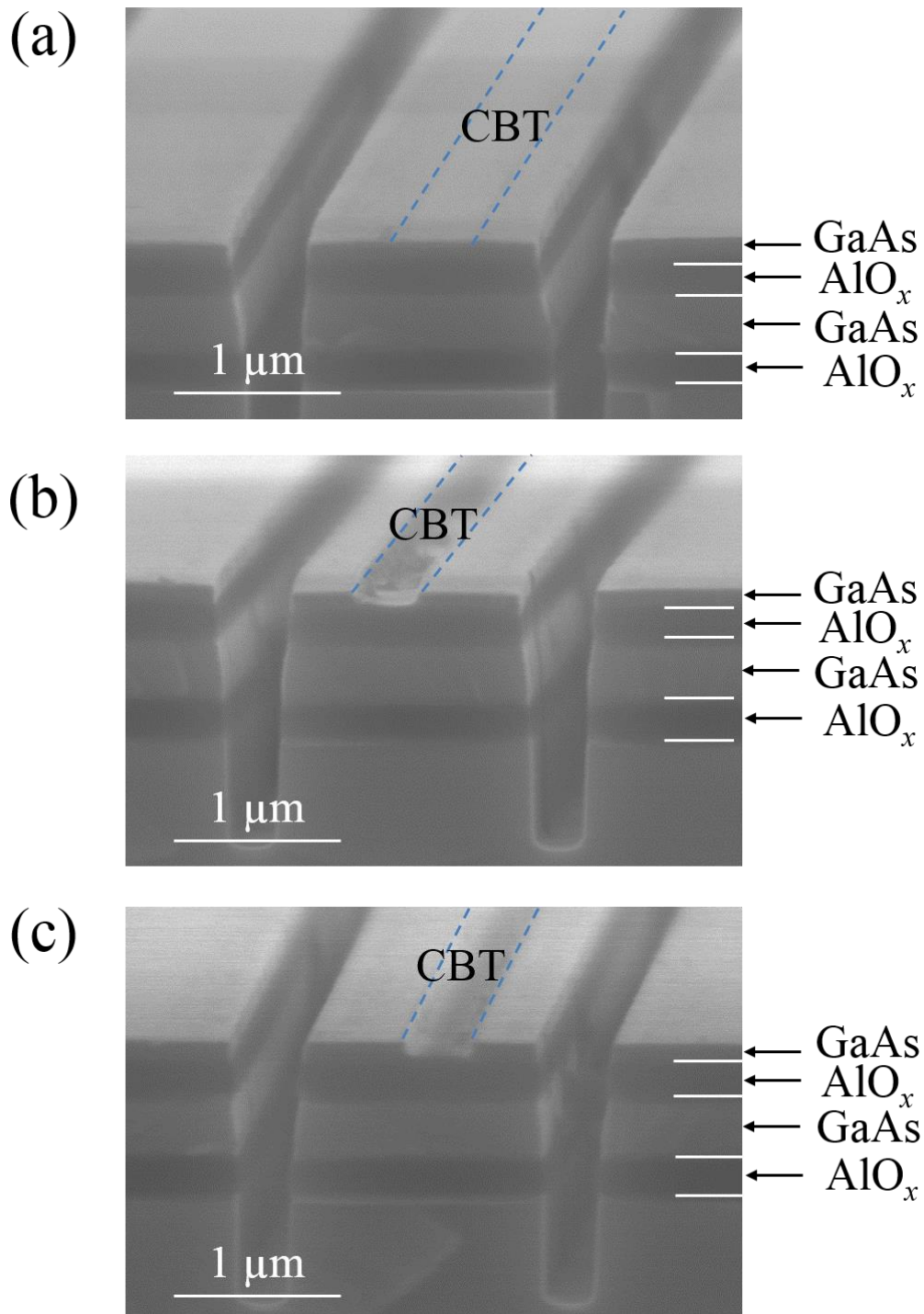


図 6.3: 平坦な GaAs/AlO_x ヘテロ層を異なる時間でエッチングした CBT の俯瞰 SEM 図: (a) 5 秒、(b) 15 秒、(c) 25 秒

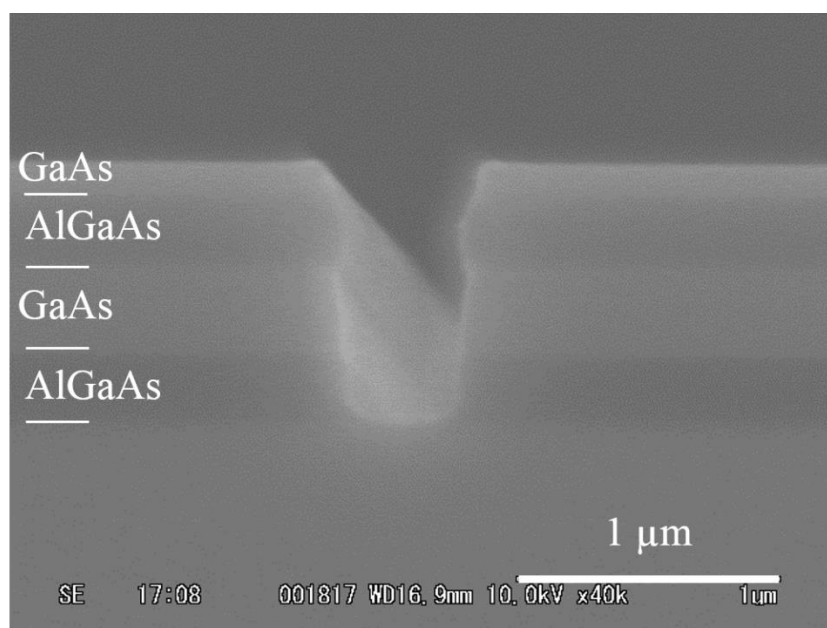


図 6.4: 元のヘテロ基板を 120 s でエッチングした CBT の SEM 断面図

6.3 フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x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。

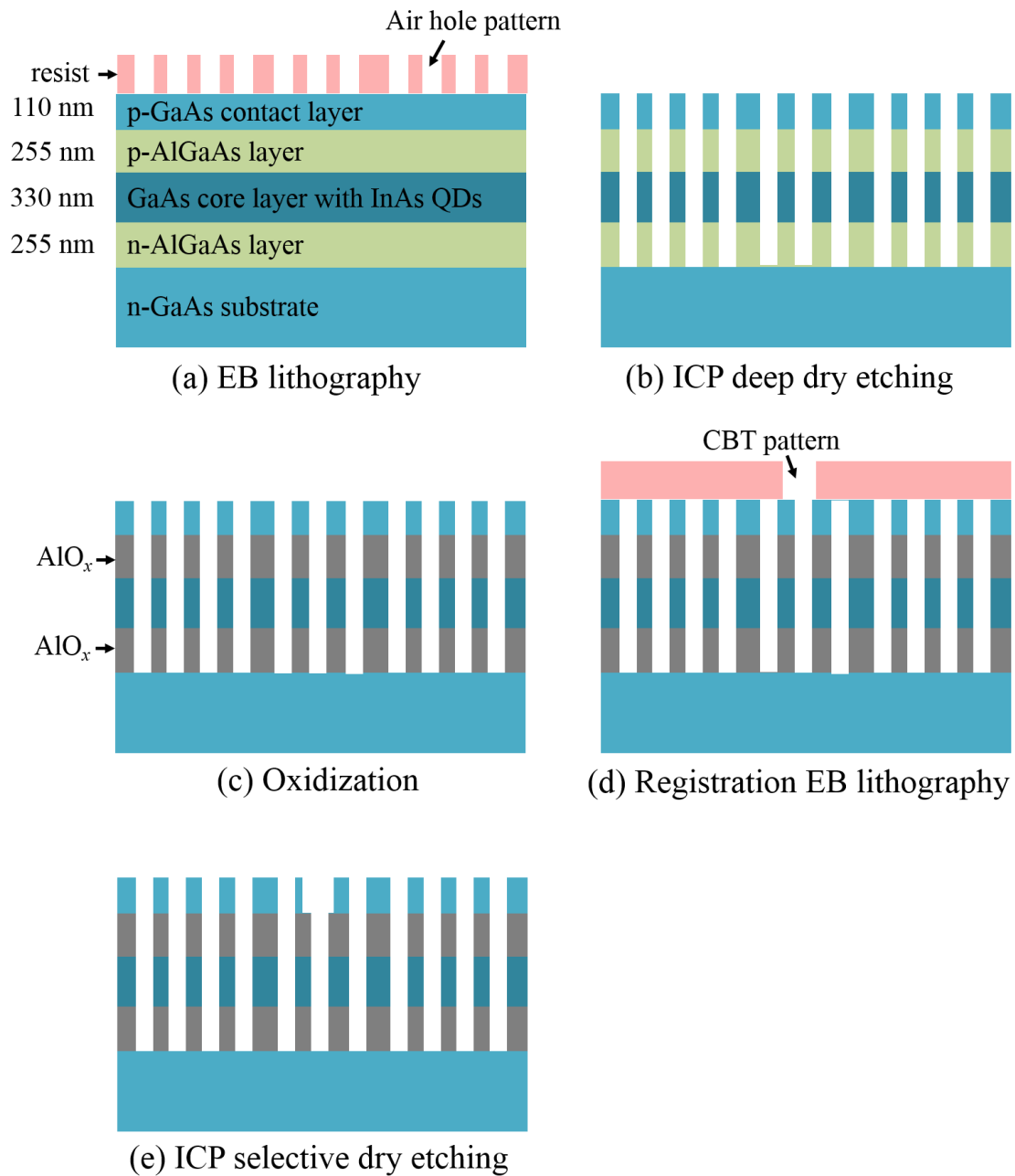


図 6.5: フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_xヘテロ層の選択ドライエッチング実験手順

6.3.2 結果及び考察

フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x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。

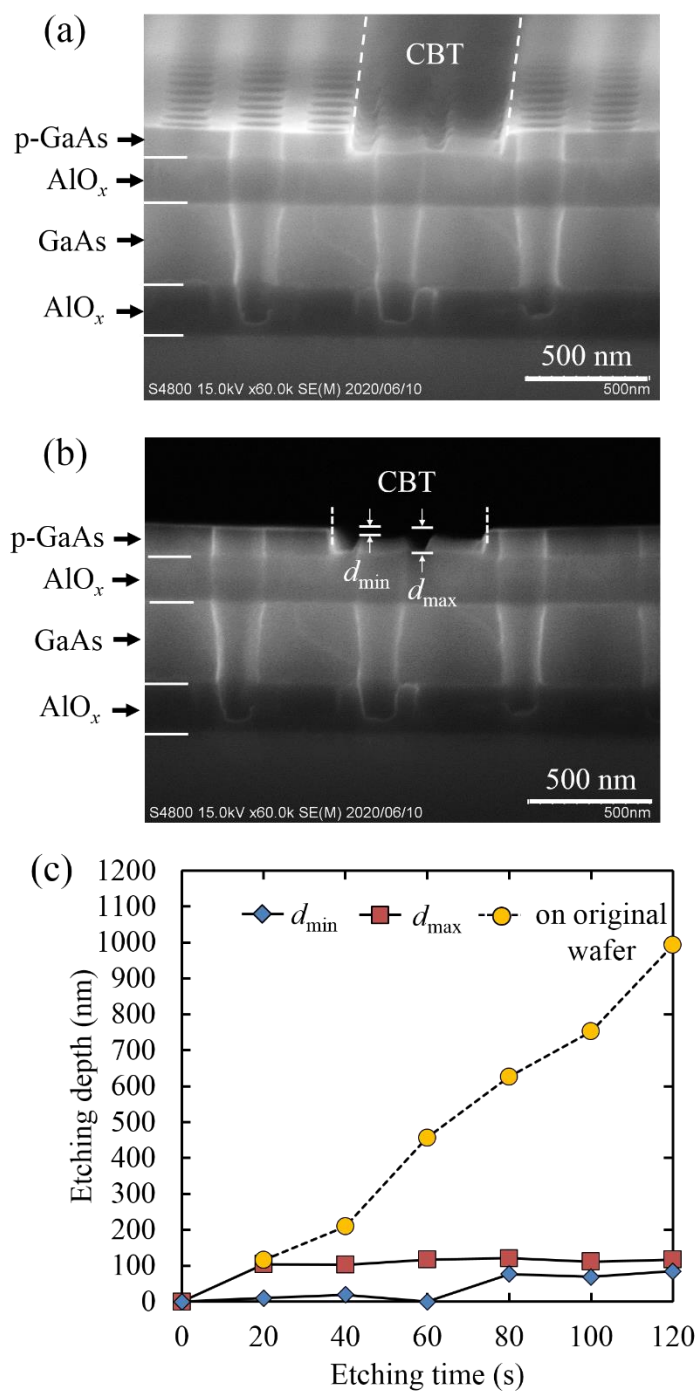


図 6.6: (a) フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x ヘテロ層を 40 秒間エッチングした CBT の俯瞰図、 (b) 断面図 (d_{\max} : CBT 内一番深いところの深さ、 d_{\min} : CBT 内一浅いところの深さ)、 (c) エッチング時間と d_{\max} 及び d_{\min} の関係 (破線: 元のヘテロ基板をエッチングする際の時間とエッチング深さの関係)

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、 AlO_x 層の表面にエッチング過程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 AlO_x の導電率の違いにより、SEM では GaAs が AlO_x 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、 d_{\max} と d_{\min} の違いは、 AlO_x 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。 BCl_3 の比率が 54.5% と高いため、反応生成物は BO_x である可能性がある。

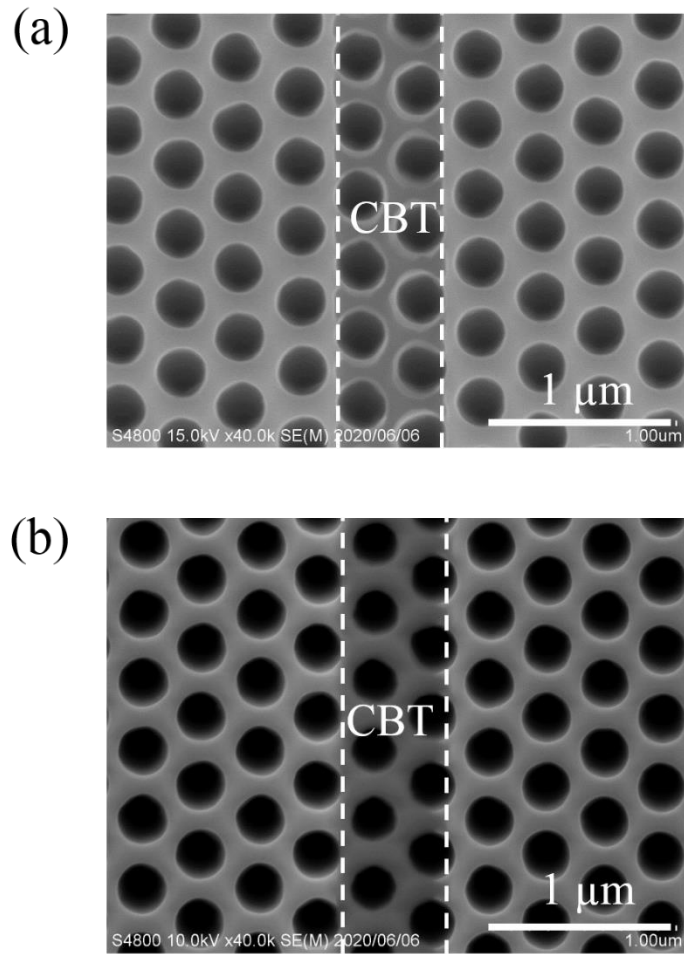


図 6.7: (a) フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x ヘテロ層を 40 秒間エッチングした CBT の上面図、(b) フォトニック結晶構造を有する GaAs/AlO_x ヘテロ層を 120 秒間エッチングした CBT の上面図

6.4 電流分離溝の電流分離効果

前節では、 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{CH}_4$ 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。

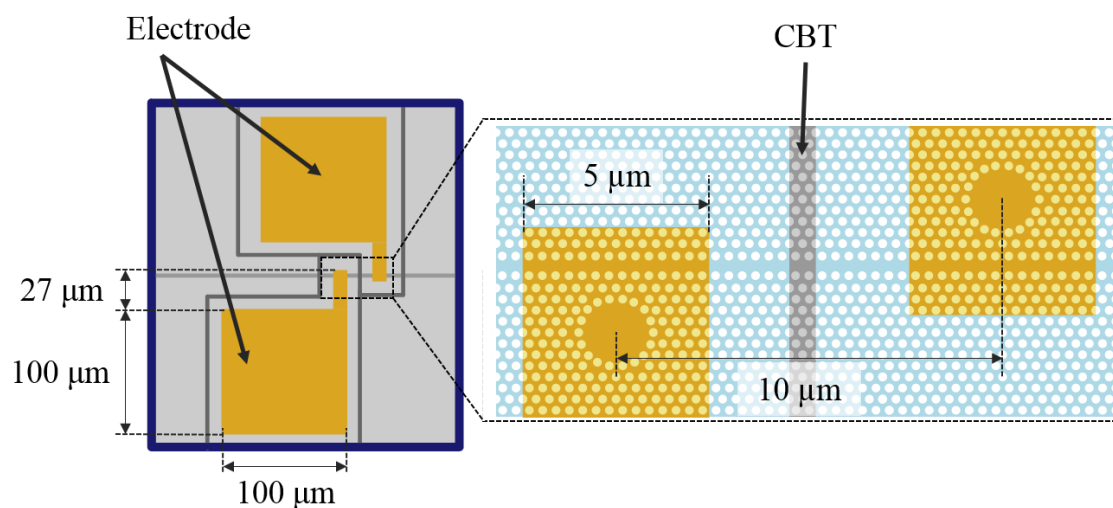


図 6.8: 円形欠陥共振器アレイの概略図

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

まず、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 $2.77a$ 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) 深堀リ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 $2.6\ \mu\text{m}$ 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 $1\ \mu\text{m}$ まで、 $0.2\ \mu\text{m}$ 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 $2\times 2\ \mu\text{m}^2$ 、ボンディング用の領域では、 $5\times 5\ \mu\text{m}^2$ 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 $5\times 5\ \mu\text{m}^2$ 、ボンディング用の領域では $100\times 100\ \mu\text{m}^2$ 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 $7.8 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ である。

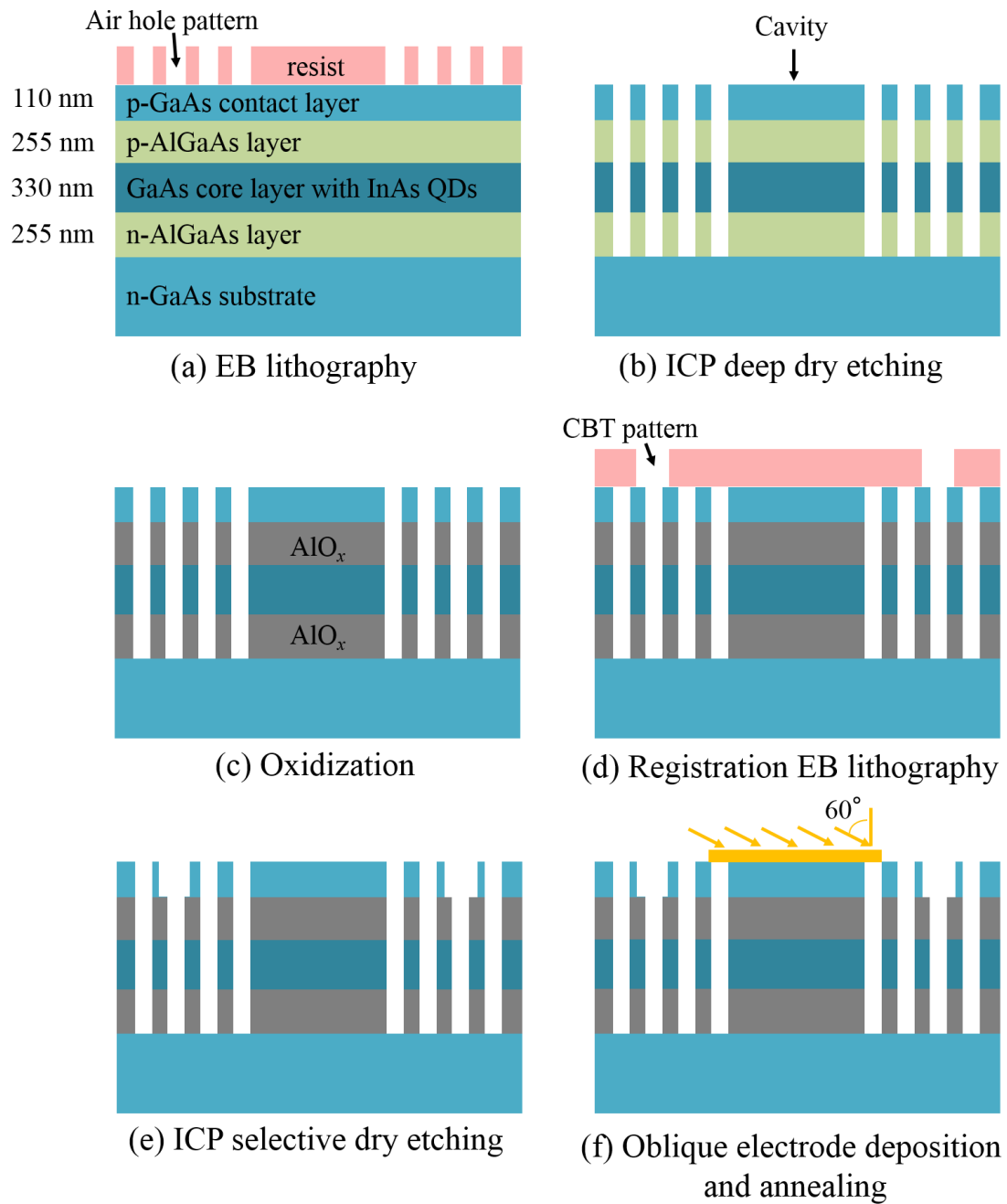


図 6.9: CBT 電流分離効果を評価する試料の作製工程の模式図

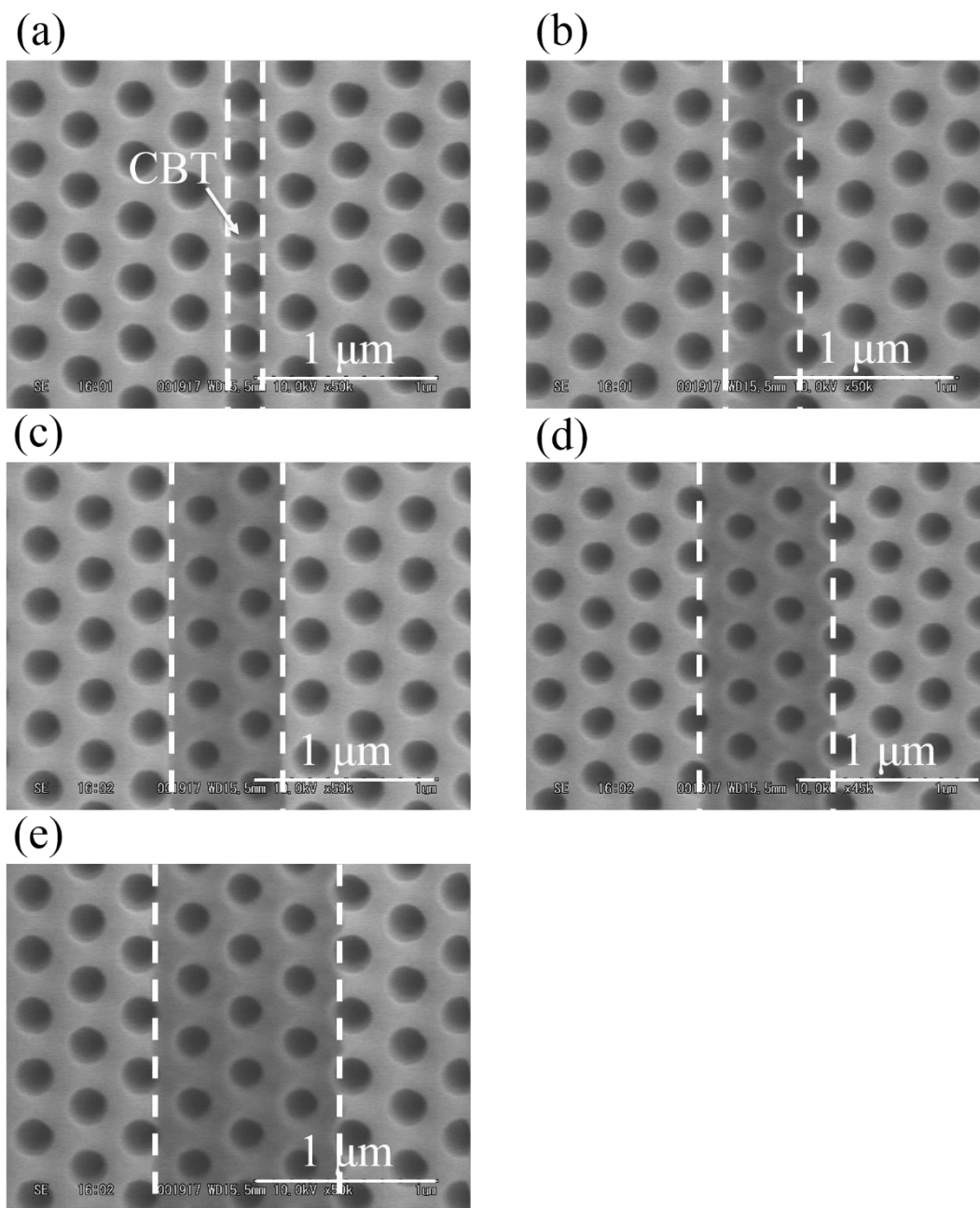
6.4.2 電気抵抗測定方法

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、 $0.2\ \mu\text{m}$ 間隔で幅を 0.2 から $1\ \mu\text{m}$ 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 $0\ \mu\text{m}$) の円形欠陥共振器アレイも作製した。



9

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

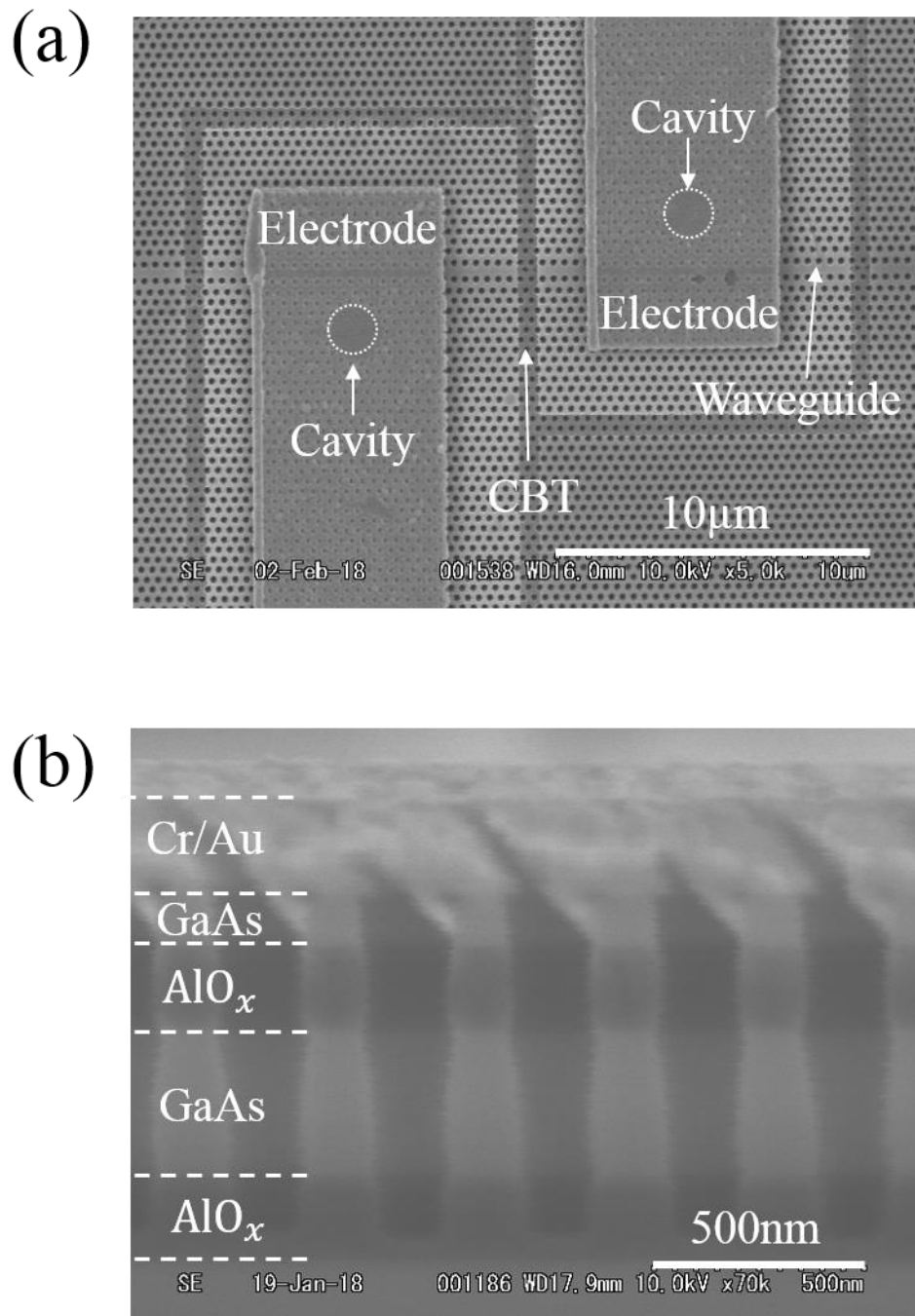


図 6.11: 作製した円形欠陥共振器アレイの SEM 図: (a)上面図、 (b) 電極部分の断面図

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 $200\ \Omega$ であり、CirD レーザの垂直方向の微分抵抗は約 $1\ \text{k}\Omega$ 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 $0.2\ \mu\text{m}$ の場合、抵抗は $2.9\ \text{k}\Omega$ から $100\ \text{M}\Omega$ 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 $0.2\ \mu\text{m}$ の CBT の中に p-GaAs が残留する可能性があることを意味する。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 $0.2\ \mu\text{m}$ の CBT 中に形成されている可能性がある。一方、幅が $0.4\ \mu\text{m}$ 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 $100\ \text{M}\Omega$ に達した。これより、CirD レーザアレイにおいて、幅が $0.4\ \mu\text{m}$ 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 $5\ \mu\text{m}$ に縮小する場合でも、幅が $0.4\ \mu\text{m}$ 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 M Ω)

CBT width (μm)	Sample 1 (Ω)	Sample 2 (Ω)	Sample 3 (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/AlO_x 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 μ A 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 μ A 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、 $25\ \mu\text{W}$ 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 $0.07\ \text{nm}$ に達し、 $50\ \text{nm}$ の波長範囲で約 $20\ \text{dB}$ の SMSR が得られた。次に、 $2.75 \sim 2.81\ a$ の範囲で共振器半径 R を変えることにより、 $20\ \text{nm}$ 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 $50\ \mu\text{W}$ 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 $0.07\ \text{nm}$ に達し、 $50\ \text{nm}$ の波長範囲で約 $28\ \text{dB}$ の SMSR が得られた。次に、 $2.75 \sim 2.81\ a$ の範囲で共振器半径 R を変えることにより、 $20\ \text{nm}$ 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。 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{CH}_4$ 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 ヘテロ層において、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 $0.4\ \mu\text{m}$ 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。

参考文献

- [1] 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.* Electrically-pumped 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 two-dimensional 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 three-dimensional 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 three-dimensional 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 photonic-crystal 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 single-cell 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 wide-bandwidth 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.* Microphotonic 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 two-dimensional 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 BCl₃-Cl₂ 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 time-multiplexed 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 N₂-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世話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、曾理氏、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

1. Xiuyu Zhang, Kento Takeuchi, Xiaolong Cong, Yifan Xiong, 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).
2. Yifan Xiong, 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).
3. Yuji Miyamoto, Yifan Xiong, 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).
4. Yifan Xiong, 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).
5. Yifan Xiong, 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).

6. Hanqiao Ye, Tomoya Nishimura, Yifan Xiong, 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).
7. Hanqiao Ye, Ryota Saeki, Yifan Xiong, 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

1. Yifan Xiong, 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.
2. [invited] Masahiko Kondow, Xiuyu Zhang, Yifan Xiong, 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.
3. Yifan Xiong, 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. Yifan Xiong, 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.
5. Hirotake Kajii, Yutaka Ohmori, Yifan Xiong, Masato Morifuji, and Masahiko Kondow, “Light-emitting devices for nanophotonics and optical signal transmission,” *Global Nanophotonics* 2016, P-49, Osaka, Japan, Nov. 30, 2016.
 6. Yifan Xiong, 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.
 7. [invited] Masahiko Kondow, Xiuyu Zhang, Yifan Xiong, 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.
 8. [invited] Masahiko Kondow, Xiuyu Zhang, Yifan Xiong, 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.
 9. Masahiko Kondow, Takafumi Hino, Satoshi Kasamatsu, Shobu Suga, Xiuyu Zhang, Yifan Xiong, 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.

10. [invited] Masahiko Kondow, Yifan Xiong, 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.
11. [invited] Yifan Xiong, 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/AlO_x Films,” *Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2018*, Wed-111-9, Seoul, South Korea, Jun. 27, 2018.
12. Takuma Umeda, Yifan Xiong, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Akihiro Maruta, and Masahiko Kondow, “1.3 μm range single mode operation of photonic crystal circular-defect microcavity laser with InAs quantum dots,” *20th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE2018)*, Mo-P-31, Shanghai, China, Spt. 3, 2018.
13. [invited] Masahiko Kondow, Yifan Xiong, 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.
14. [invited] Masahiko Kondow, Takuya Yamaguchi, Yifan Xiong, 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, Yifan Xiong, 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.

16. Hanqiao Ye, Tomoya Nishimura, Takuya Yamaguchi, Yifan Xiong, Masato Morifuji, Hirotake Kajii, Masahiko Kondow, “High frequency characteristics analysis of photonic crystal circular defect laser,” *Asia Pacific Society for Materials Research(APSMT) 2019 Annual Meeting*, P-16, Sapporo, Japan, 2019.
17. [invited] Masahiko Kondow, Yifan Xiong, 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

1. 井上聖貴, 張秀宇, 熊一帆, 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.
2. Yifan Xiong, 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, 熊一帆, 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氣的分離,” *2018年電子情報通信学会エレクトロニクスノサイエティ大会*, C-4-3, 金沢, 2018年9月.

4. 葉 漢橋, 西村智也, 熊 一帆, 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.
5. 溝口 舜, 熊 一帆, 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, 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.
7. Yifan Xiong, 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.
8. Takumi Okunaga, Yifan Xiong, 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.
9. Kotaro Hagura, Takuya Yamaguchi, Yifan Xiong, 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.

11. 小暮 崇史, 熊 一帆, 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)