

令和二年度 修士論文

近赤外センシングに向けた GaAs/InGaP
光集積フェーズドアレイ素子の開発

Development of GaAs/InGaP Integrated
Optical Phased Array for Near-Infrared
Sensing Applications

2021 年 1 月 28 日 提出

指導教員 中野義昭 教授

東京大学大学院 工学系研究科
電気系工学専攻

37-196494 土屋 里穂子

論文要旨

光フェーズドアレイは、機械的な駆動部分を持たないため、信頼性が高く、低消費電力かつ高速駆動が可能な光偏向素子として注目を集め、近年は自動運転用 LiDAR などへの応用目的で研究されている。先行研究では、Si や InP を用いた $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波長帯において動作する素子が数多く報告されている。その一方で、LiDAR や OCT を始めとしたバイオイメージングの分野において、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 帯と呼ばれる $1\text{ }\mu\text{m}$ 付近での波長が注目されている。これまでに $1\text{ }\mu\text{m}$ 帯に向けた光フェーズドアレイ素子は報告例があるものの、いずれも導波路本数 10 以下の極めて小規模なものである。さらに、その酸化しやすさから大規模化を妨げる要因となる AlGaAs がクラッド層に使用されていたり、位相変調速度が比較的低速な熱光学効果を用いた位相変調器を使用していたりといった問題点が存在する。

本研究では、先行研究のこれらの課題を踏まえ、GaAs 基板に格子整合した InGaP を用いた新たな光集積回路プラットフォームを提案する。提案構造では Al を用いないことで、歩留まりの大幅な改善が期待でき、大規模な光フェーズドアレイ集積回路の実現が期待される。加えて、キャリア効果駆動の位相変調器によって、高速ビーム偏向が達成可能となる。今回、 1×25 光集積フェーズドアレイ素子について、基板構造、エッチング深さ、曲げ半径、スターカプラ長などの各種パラメータを数値解析により決定し、レイアウトの設計を行った。さらに、本研究室において未確立であった GaAs/InGaP での光導波路作製技術の確立のため、および位相変調器の特性を実験によって実証するために、直線導波路およびマッハツェンダー干渉計で構成される特性評価用の素子の作製を行った。作製にあたって、InGaP のエッチング時に生じたポリマーが残留したことによる基板表面の荒れを解消するため、サイクルドライエッチングの条件を変更し、改善を行った。作製された電流電圧特性の結果は良好で、光学系を用いた導波路測定において光の導波を確認することができた。作製した導波路は伝搬損失が大きく、ファブリペロー共振や非対称マッハツェンダーでの透過スペクトルのピークを確認することはできなかった。これは作製時に使用した基板の下側クラッドの厚さが薄かったことが主な原因と推察される。これらの原因を取り除くことで、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 帯での位相変調器は容易に実証可能であると考えられる。さらに、今回確立した作製プロセスは、そのまま光フェーズドアレイ素子の作製に使用できるため、フェーズドアレイ素子の作製および実証も期待できる。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	光集積フェーズドアレイ	1
1.1.1	現行の光偏向素子と光フェーズドアレイ	1
1.1.2	光フェーズドアレイの応用	1
1.1.3	光フェーズドアレイ素子の研究現況	5
1.2	本研究の目的	10
1.3	本論文の構成	11
第 2 章	原理	12
2.1	導波路解析	12
2.1.1	多層スラブのモード解析	13
2.1.2	等価屈折率法	15
2.2	光フェーズドアレイ	16
2.2.1	位相変調器による光ビーム偏向	16
2.2.2	2次元ビーム偏向	17
2.3	位相変調の原理	18
2.3.1	クラマース・クロニツヒの関係式	18
2.3.2	熱光学効果	19
2.3.3	キャリア効果	20
2.3.4	電気光学効果	21
第 3 章	GaAs/InGaP 光フェーズドアレイの設計	22
3.1	基板層構造	22
3.2	導波路構造	24
3.3	位相変調器の構造	26
3.3.1	位相変調器長	26
3.3.2	電極に使用する金属	28
3.4	1×25 光フェーズドアレイ素子の設計	29
3.4.1	スターカプラ長	29

3.4.2	全体のレイアウト	29
3.5	位相変調器の特性評価用素子の構成	31
第 4 章	半導体プロセス	33
4.1	半導体プロセス技術	33
4.1.1	薄膜作製技術	33
4.1.2	エッチング技術	35
4.2	素子の作製プロセス	38
4.2.1	プロセスフロー	38
4.2.2	エッチング条件	44
4.3	位相変調器の特性評価用素子の作製結果	47
第 5 章	測定	50
5.1	電流電圧特性の評価	50
5.2	光学特性の評価	51
5.2.1	導波路測定に用いた光学系	51
5.2.2	導波路特性	51
5.3	測定結果からの考察	52
第 6 章	結論	54
	参考文献	56
	発表文献	60
	謝辞	61

第 1 章

序論

1.1 光集積フェーズドアレイ

1.1.1 現行の光偏向素子と光フェーズドアレイ

光偏向素子は、その名の通り入力したレーザー光などの光ビームの伝搬方向を変化させる素子である。その応用範囲は広範で、スキャニングやリモートセンシング、イメージングなどに利用されている。どの領域においても、信頼性が高く、高速で広範囲なビーム掃引が可能な素子の登場が渴望されている。

現在産業レベルで実用化されている光偏向素子の代表例として、ガルバノミラー・ポリゴンミラーなどが挙げられる。ガルバノミラーとポリゴンミラーはミラーをモーターで回転させ、レーザーから照射された光をミラーに反射させることで光ビームの偏向を行っている。ビーム走査速度はモータの回転速度に依存するため数十 kHz が限界であり、消費電力は数 W 程度、素子サイズは数 cm 四方である。

一方、光フェーズドアレイは機械的駆動部分を持たない光偏向素子である。1 MHz で駆動が確認されたという報告 [1] があるが、潜在的にはナノ秒オーダーでの高速応答が可能であることに加え、素子サイズは数 mm 四方と小型で、消費電力も数十 mW という利点を有する。

1.1.2 光フェーズドアレイの応用

光フェーズドアレイの応用を、本研究での対象となる近赤外帯を中心に、他の各波長帯についても紹介する。

近赤外帯

人の目に対して安全な波長帯で、 $1.3\ \mu\text{m}$ や $1.55\ \mu\text{m}$ が光通信に利用されていることは知られているが、近年では LiDAR (Light Detection And Ranging) など新たな応用先が提

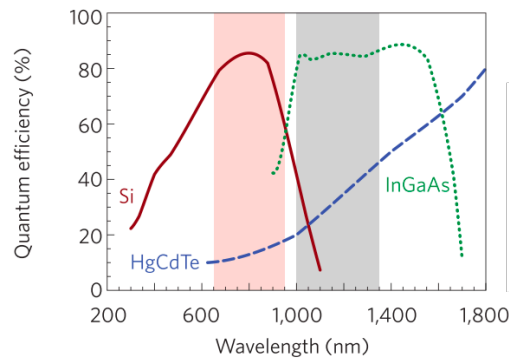


Fig. 1.1 Sensitivity curves for typical cameras based on silicon (Si), indium gallium arsenide (InGaAs) or mercury cadmium telluride (HgCdTe) sensors [8].

案されている [2]。シリコンフォトリソ技術を利用できるため、1550 nm の波長での光フェーズドアレイ素子の研究は盛んに報告されている [1, 3–6]。さらに、次から説明する理由から LiDAR や OCT などのバイオセンシング分野においては、1 μm 帯と呼ばれる波長 1 μm 付近の利用に注目が集まっている。

自動運転向けの LiDAR での利用において、入力光波長は 1550 nm の他に 1 μm 帯から波長 905 nm や 940 nm も候補に挙げられている。1550 nm と 1 μm 帯の波長とを、次に述べる 3 つのポイントにおいて比較して論じる。1 つ目は水による光の吸収である。1 μm 帯と比べ、1550 nm では水による光の吸収量が 2 桁高い [7]。自動運転向けの LiDAR では悪天候でも正常に作動する必要があることを考えると、この違いは大きい。2 つ目は人間の目への安全性である。1 つ目のポイントの裏返しとなるが、1550 nm のほうが眼底に届くまでに水に吸収される光量が大きいいため、人の目に対してはより安全であると言える。どちらも適切に利用すれば人の目に害を与える波長ではないものの、1550 nm のほうがより大きな出力光強度が許容される。3 つ目は受光器のコストである。1550 nm では高価な InGaAs 受光器が必要であるのに対して、1 μm 帯で安価なシリコン製受光器を利用できる。Fig. 1.1 に各波長に対する受光器の量子効率を示す。

1 μm 帯の中でも 905 nm や 940 nm が選ばれている理由を述べる。905 nm はシリコン受光器の最大効率を取る波長であることが理由と推察される。一方、940 nm は LiDAR にとってノイズとなる太陽光スペクトルが極小となる波長であることが理由である [9]。Fig. 1.2 に地上で観測された太陽光放射強度スペクトルを示す。

バイオセンシング技術の 1 つである OCT (Optical Coherence Tomography) への応用においては、1050 nm 付近の波長が注目されている。1990 年代に提唱された OCT は光の干渉を利用して、眼組織や胃壁の断層画像のイメージングを行う技術である [10]。OCT の基本構成を Fig. 1.3 に示す。低コヒーレンスである広帯域光源を使用し、マイケルソン干渉計の原理を用いて、サンプルからの反射光と参照ミラーの反射光の光路長差を測定する。スキャン場所の深さ方向の移動は参照光のミラーの掃引 (A スキャン) で達成され、干渉光

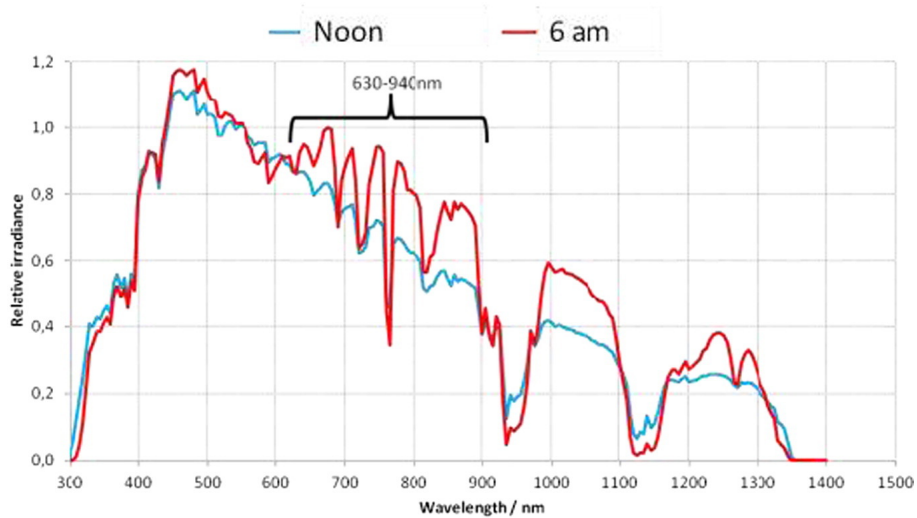


Fig. 1.2 Relative irradiance of the sun at noon and 6am [9].

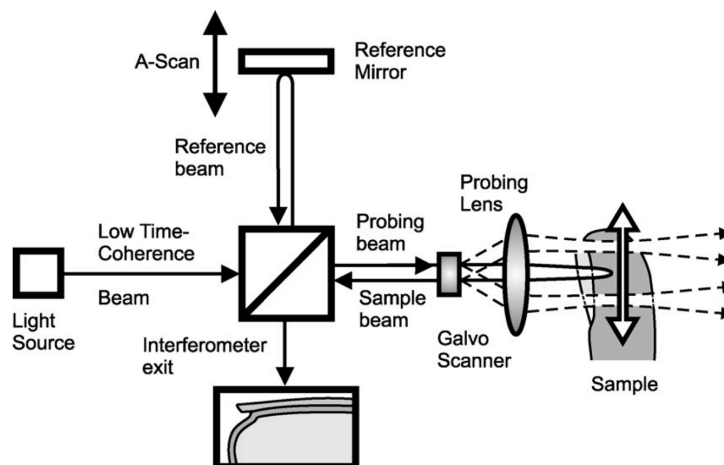


Fig. 1.3 Basic OCT elements [11].

の強度の測定を行う。サンプル表面の1方向への移動は、ビーム偏向素子（この図の場合はガルバノスキャナ）でのビーム掃引（B スキャン）で達成される。これら2つのスキャンで取得した干渉光強度を画像化し、サンプルの断層画像を取得する [11]。

従来型のものでは 800～900 nm のレーザー光が多く利用されている。しかし、800 nm 程度の短い波長の光は網膜色素上皮で吸収や散乱が起こりやすいという性質があり [12]、網膜色素上皮よりも深い領域ではイメージング画像が不鮮明となる。深達性を高めるためにはこれより長い波長が適している。Fig. 1.5 に 1050 nm と 840 nm での OCT スキャン画像を示す。840 nm と比較すると、1050 nm は深い領域での鮮明度が向上していることが読み取れる。しかし、Fig. 1.4 に示す通り、さらに長波長になると水による光の吸収が著しく増加してしまい、そもそも網膜に届く光量が減少してしまうというトレードオフの関

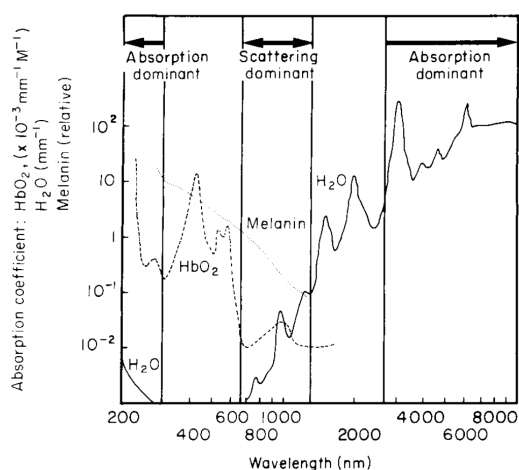


Fig. 1.4 The absorption spectra of water, oxyhaemoglobin and melanin [13].

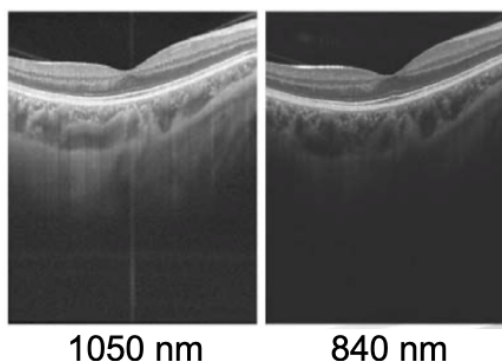


Fig. 1.5 OCT imaging at 840 nm and 1050 nm [14].

係がある。深達性の向上のためできるだけ長波長で、眼底に届く光量の確保のため水の吸収がなるべく小さい波長を選択する必要がある。それらを踏まえて注目されるのが、水の吸収の極小点となる 1050 nm 付近の波長である。この波長帯は受光器の観点からも、利点がある。CCD イメージングセンサなどシリコン製受光器の使用可能帯域はおよそ 300 nm ~1100 nm とされている。1100 nm を超える波長では非常に高価な InGaAs カメラを用いる必要があり、これによるコストの増加は産業的には大きな障害となる。1050 nm がシリコン受光器を利用可能な波長であることは、産業化を見据えた場合に大きなメリットとなるポイントである。

可視光 (380~780 nm)

近年、VR/AR ウェアラブルデバイスが注目を浴びているが、これらのデバイスにも光偏向素子が利用されている。その例として、網膜投影式のメガネ型ウェアラブルデバイスを紹介する。Fig. 1.6 に示しているのは網膜投影式のメガネ型 AR ウェアラブルデバイスで、QD Laser 社によって販売されている。小型のプロジェクタユニットに光偏向素子を搭載しており、HDMI 接続した機器からのデジタル映像を網膜に直接投影できる。装着者の視力に依存せずに映像を見ることができるため、視力に問題があってもクリアな映像を楽しむことができる [15]。

中赤外光 (2000~15 000 nm)

中赤外光は、ガス検知の領域で活用されており、赤外線式ガス検知器で用いられるのも中赤外光である。ガス検知の原理は、検知するガスによる吸収が大きい波長の光を検知を行う対象に照射し、通過した光もしくは散乱光を受光器で測定するという仕組みである。検知の対象となる二酸化炭素やメタンガスなどの吸収がピークとなる波長を含むことから、



Fig. 1.6 RETISSA DisplayII (QD Laser, 2019) [15]

中赤外光が活用されている。

光フェーズドアレイの応用としては、差分吸収ライダー (Differential Absorption LiDAR; DIAL) が挙げられる。これは LiDAR の元々の利用領域であった気象学で、気体成分を測定する手段として利用されている。差分吸収ライダーは、測定の対象の気体分子による光の吸収と、成層圏のエアロゾルや大気分子による光の散乱の両方を利用した技術である。測定には 2 つの波長を用いる。1 つはオン波長と呼ばれ、対象の気体分子による吸収が大きい波長で、もう一方はオフ波長と呼ばれる吸収が小さい波長である。気体によって吸収スペクトルが異なるため、2 つの波長を慎重に選定することによって、ある気体に対する測定に対して他の分子が与える影響を小さくすることが可能である [16]。

別の応用先としては、自由空間通信 (Free Space Optical Communications; FSOC) も提案されている。FSOC に向けては、中赤外光の中でも、大気の窓と呼ばれる大気による光の吸収が小さい波長帯が注目されている。さらに、中赤外光は水による吸収が大きいいため、目に対する安全性が高く、放射パワーを大きくしても安全性が担保されているという利点もある [17]。

1.1.3 光フェーズドアレイ素子の研究現況

光フェーズドアレイ素子の研究報告を、本研究での対象である近赤外帯、特に $1\mu\text{m}$ 付近の波長に対するものを中心に、他の各波長帯についても紹介する。

近赤外帯

すでに報告例が多い 1550nm に向けたフェーズドアレイ素子のうち、注目すべき研究例と、 $1\mu\text{m}$ 帯の素子の報告例を紹介する。Fig. 1.7 は Si を用いた 2 次元アレイ型の光フェーズドアレイ素子である [4]。この素子は導波路の出射端を 2 次元アレイ型に並べることで、熱光学効果による位相変調のみで 2 次元ビーム掃引を達成している。ファイバから入射した光は 64 個のアンテナ部分に送り込まれる。そこでヒーターによる加熱を受けることで熱光学効果による位相変調が行われた後、回折格子構造の部分から空間へ光が放出されてい

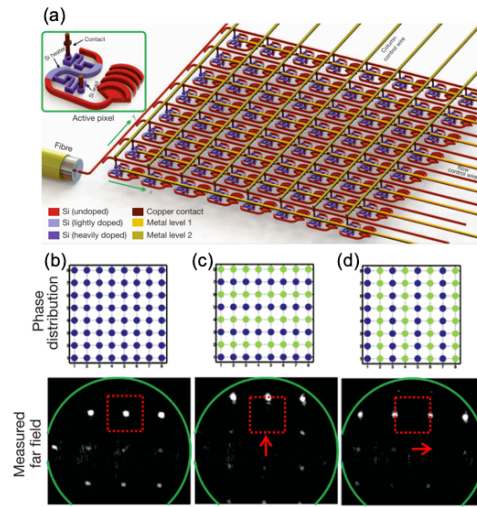


Fig. 1.7 Large-scale Si 2D OPA device [4]. (a) Schematic illustration of 8×8 OPA. (b)-(d) Examples of the phase distributions and far-field patterns.

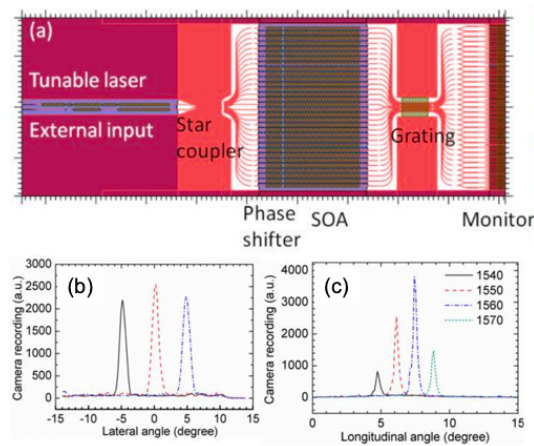


Fig. 1.8 Large-scale InP 2D OPA device [1]. (a) Layout of the PIC. (b) Beam profiles for different lateral angles. (c) Beam profiles for different wavelengths.

る。行ごと列ごとにヒーターは繋がって接続されており、1つ1つの位相を独立には制御できないものの、遠視野像で二方向へのビーム形成位置の移動が達成された。

Fig. 1.8 は InP 基板を利用した回折格子集積型の光フェーズドアレイ素子である [1]。この素子は SOA (Semiconductor optical amplifier) や干渉計モニタも、同じチップ上に集積されているという点においても非常に興味深い。チップ端面に平行な方向へは 32 本の各導波路に接続された電流注入駆動のキャリア効果による位相変調器を用いて、チップに対して鉛直方向へは回折格子構造を利用した波長掃引によって、2次元のビーム偏向を実現した。

Fig. 1.9 は GaAs をコアにしたポッケルス効果駆動の光フェーズドアレイである [18]。

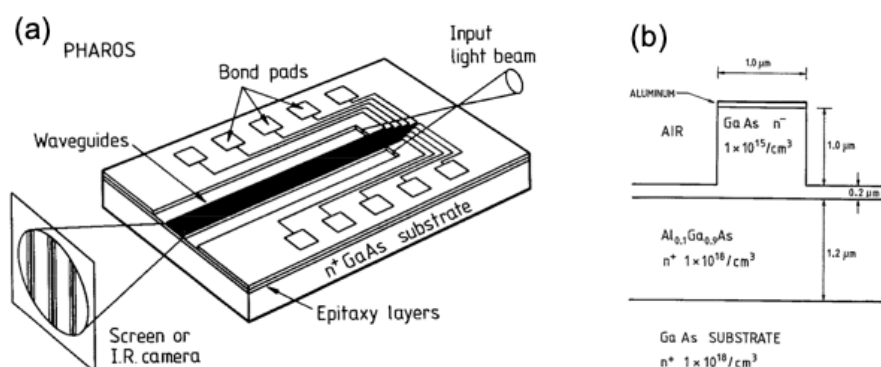


Fig. 1.9 GaAs OPA device for 1060 nm (DRA, 1991) [18]. (a) Schematic diagram of the device showing the input light beam, the ten guide device and the bore-sight diffraction pattern on a screen. (b) Cross section diagram of a single waveguide.

11 μmm 帯の光に対しては、光のエネルギーがバンドギャップを超え吸収が起こってしまうため、Si や InGaAsP (InP 基板を用いる場合コアとして利用される) などを用いることはできない。よって、よりバンドギャップが大きい GaAs をコアに用いている。10 本の導波路にそれぞれポッケルス効果駆動の位相変調器が配置されており、およそ 30 V で 2π の位相変調が実現されている。電圧を印加する結晶方位によって、変調特性に差が生じたという結果も示されている。ドライバ回路の駆動速度に律速されているため、100 MHz 程度に制限されている。その制限がなければこの位相変調器は 2 GHz の速度で駆動可能とされており、さらに高速なビーム偏向が可能となる。Fig. 1.10 は SiN をコアにした回折格子集積型の光フェーズドアレイである [19]。Si は波長 905 nm の光に対して透明でないので、SiN がコアとして採用されている。1 つのチップに 4 つの回折格子定数の異なる導波路本数 4 本の光フェーズドアレイが配置されている。入力された光は、位相変調器によって駆動するリング共振器スイッチによって、4 つのうちのいずれかに入射され、熱光学効果で位相変調された後、回折格子構造で自由空間に放出される。一方向への偏向は位相変調によって、もう一方向への偏向はスイッチによる OPA 素子の切り替えによって実現されている。スイッチによる切り替えでは、出射角は素子ごとに離散的な値となるが、可変波長光源なしでビーム偏向が行えている。この手法の問題点としては、連続的な偏向が行えないことと、チップサイズが大きくなることが挙げられる。位相変調器の特性としては、87.6 mW で π の位相変化を得られている。

これらの 1 μm 帯フェーズドアレイの先行研究のポイントを Table 1.1 に示す。いずれもアレイ本数は 10 以下で大規模化には至っていない。Wight らによって報告された素子は、クラッド部分に AlGaAs が使用されているが、Al 化合物は大規模化が困難となる要因となる [18]。その理由として、Al 化合物は酸化しやすく、ドライエッチングや再成長の際の劣化が著しいことが知られている [20]。Tyler らに報告された素子はコアに SiN を用い、熱光学効果で位相変調を行っている [19]。熱光学効果を用いる場合、応答速度が ms オー

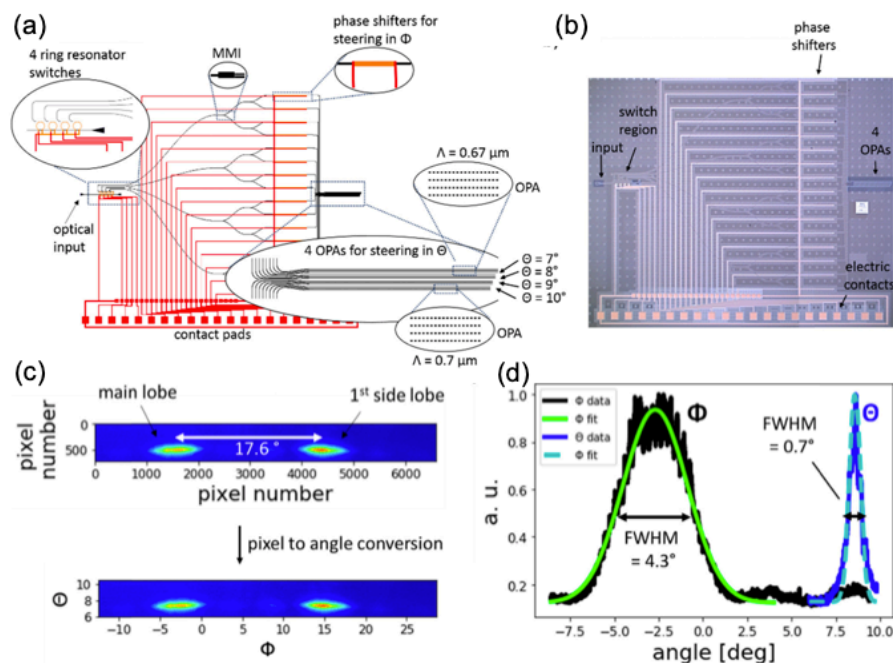


Fig. 1.10 SiN 2D OPA device for 905 nm [19]. (a)(b) Schematic and microscope image of the proposed two-dimensional beam steering device. (c) Intensity recorded at the far field camera. (d) Cross sections in ϕ and θ of the main lobe to determine the FWHM.

Table 1.1 Previous studies of 1 μ m band OPA [18] [19]

	DRA (1991)	Leti (2019)
Wavelength [nm]	1060	905
N of arrays	10	4
Phase shifter	Electro-optic	Thermo-optic
Material	GaAs/ AlGaAs	Si ₃ N ₄ /SiO ₂

ダーに律速されてしまうため、高速変調には適さない。

1 μ m 帯の光のエネルギーは Si のバンドギャップより大きいため吸収が大きく、光を閉じ込めるコア層として Si を利用することができない。ゆえに、1 μ m 帯のデバイス作製においては、産業レベルまでに確立されたシリコンフォトリソグラフィの技術の転用ができない。実用化に向けてはデバイス作製技術の発展も必要とされている。

可視光 (380~780 nm)

Fig. 1.11 は 488 nm の波長へ向けたフェーズドアレイ素子である [21]。64 本の SiN の導波路に接続された、熱光学効果による位相変調器によってビーム偏向が実現されている。この素子ではより広いビーム掃引角を達成するため、出射部の導波路間隔が等間隔ではなく、ランダムに配置されている。また、作製誤差による位相誤差を遺伝的アルゴリズムに

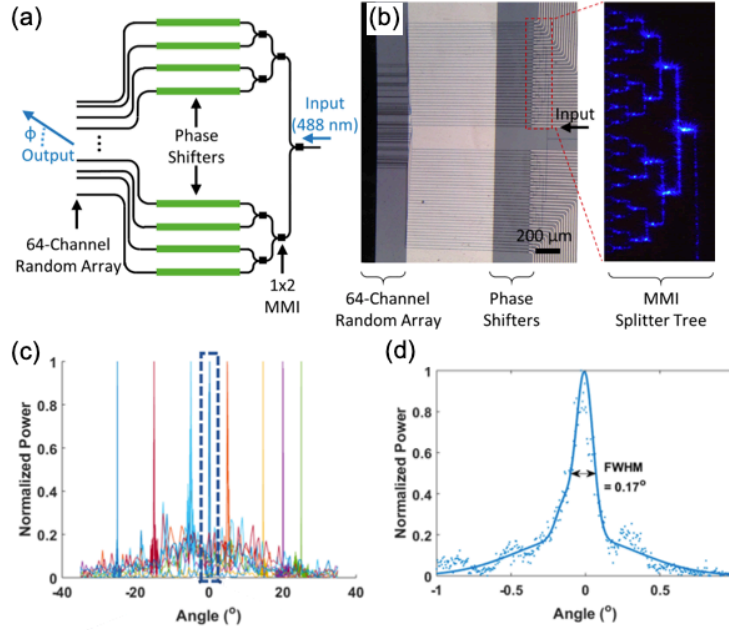


Fig. 1.11 SiN OPA device for 488 nm [21]. (a) Schematic of a one-dimensional 64-channel blue phased array with random emitter spacing. (b) Microscope image of fabricated device. (c) Measured optical power versus angle for converged beams at different angles in the phase-controlled axis. (d) Magnified view of converged beam at 0°.

よって補正している。

中赤外光 (2~15 μm)

Fig. 1.12 は 4600 nm の波長帯に向けたフェーズドアレイ素子である [17]。Ge をコアに用い、SiN の回折格子構造を集積している。Si 導波路においてクラッドとして利用される SiO₂ は中赤外光を強く吸収してしまうため、2~14 μm の波長帯域に透過性がある Ge が導波路に用いられている。さらに、Ge は Si と比較して、高い屈折率を有し、熱光学効果や自由キャリアプラズマ効果が大きいという利点も有する。12 本の導波路に接続された熱光学効果による位相変調器によるビーム偏向と、回折格子構造を集積し波長掃引によるビーム偏向で 2 次元のビーム偏向を実現している。位相変調器の特性としては、100 mW 程度で 2π の位相変化を得られている。

中赤外光の光源として利用される量子カスケードレーザー (Quantum cascade laser; QCL) を同じチップ上に集積した光回路素子も報告されており [22]、フェーズドアレイ素子での光源集積も期待できる。

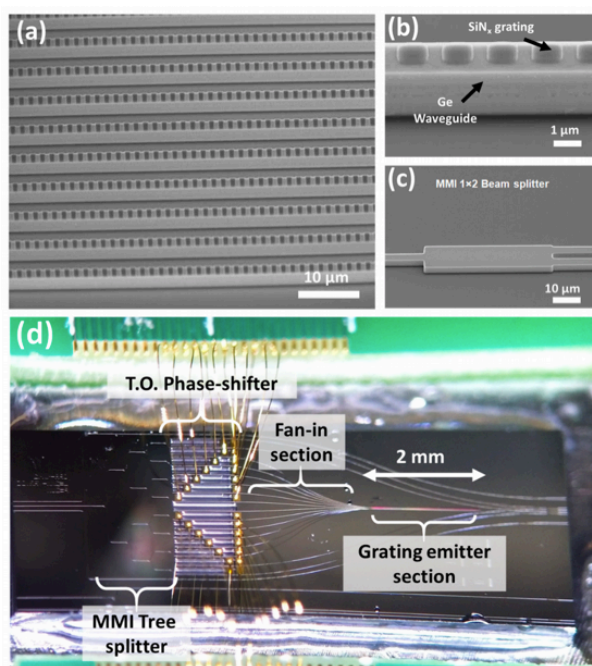


Fig. 1.12 Ge/Si 2D OPA device for 4600 nm [17]. (a) SEM picture of grating emitter waveguide array. (b) Detailed view of a Ge waveguide with SiNx grating on top. (c) SEM picture of a MMI 1×2 beam splitter. (d) Microscope picture of a packaged 12 channels OPA Beam-steering experiments in the MWIR.

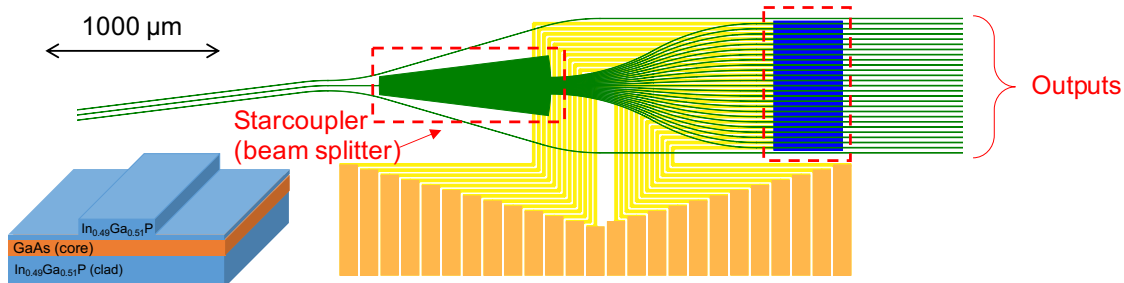


Fig. 1.13 Optical phased array device

1.2 本研究の目的

本研究では、バイオイメージングや LiDAR の応用に向けた $1 \mu\text{m}$ 帯の波長を対象とし、ns オーダーの応答が可能なキャリア効果で位相変調を行う、光フェーズドアレイ素子の開発を行う。Fig. 1.13 に提案する光フェーズドアレイ素子の構成を示す。

導波路には InGaP/GaAs/InGaP のダブルヘテロ構造を用いる。コア層には GaAs を、クラッド層には GaAs に格子整合した $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ を用いることで、効率的に光閉じ込

め・キャリア閉じ込めを実現する。クラッド層には、その酸化されやすさから大規模化を阻害する要因となっている Al 化合物ではなく、InGaP を用いることで、アレイ本数の大規模化が可能になる。

光位相変調器にはキャリア注入/空乏効果、ポッケルス効果、フランツケルディッシュ効果などの利用が考えられる。今回は、作製が容易かつ高効率動作が得られるキャリア注入効果の利用を検討する。

将来的には、本研究室で研究されている歪み補償 InGaAs/GaAsP MQW の成長技術を利用し、大規模光フェーズドアレイに光源や半導体光増幅器 (SOA) の集積を行うことを視野に入れている。

1.3 本論文の構成

第 1 章 本研究の背景と目的を説明した。今回の研究対象である近赤外帯の光フェーズドアレイの応用や研究例を中心に、本研究の意義を述べた。

第 2 章 本研究で用いた様々な原理について述べる。光フェーズドアレイのビーム偏向の原理、位相変調の原理および本研究で用いた光導波路解析の原理について述べる。

第 3 章 GaAs/InGaP 光フェーズドアレイ素子の設計について述べる。数値解析によって各種パラメータの決定を行い、その上で 1×25 光フェーズドアレイ素子のレイアウトを設計した。

第 4 章 半導体素子の作製について記述する。本研究で利用した半導体プロセス技術の原理を述べ、プロセスフローや実際のプロセス条件を記す。

第 5 章 作製した導波路および位相変調器の測定結果を述べる。電流電圧特性の測定および光学系を用いた導波路測定の結果を記し、測定結果に対する考察を述べる。

第 6 章 本研究をまとめ、さらに今後の研究の展望を記述する。

第 2 章

原理

2.1 導波路解析

導波路は光を閉じ込めて伝搬させる構造である。ここでは、導波路の原理を述べるにあたって重要な全反射と固有モードについて述べる。

屈折率 n_1 から n_2 の空間に光が入射する場合、入射角を θ_1 、反射角を θ_2 とおくと、スネルの法則より以下の関係が成立する。

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.1)$$

$n_1 > n_2$ のとき、 $\theta_1 < \theta_2$ である。 θ_1 を大きくしていったとき、 θ_2 が $\pi/2$ になる入射角 θ_1 を臨界角と呼ぶ。臨界角を θ_c とおくと、次の式が成り立つ。

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

$\theta_1 > \theta_c$ のとき、入射した光は全反射する。光導波路はこの現象を利用して、屈折率の低い材料（クラッド）で屈折率の高い材料（コア）を覆い、コア中に光を閉じ込めて光を導波させる。

三層のスラブ導波路中を y - z 面に平行に全反射角 θ で伝搬する平面波を考える。ここで、コアの屈折率を n_1 、クラッドの屈折率を n_2 、コアの厚みを a と置く。平面波の z 方向への伝搬定数を β とおくと、次のように表される。

$$\beta = k_0 n_1 \sin \theta \quad (2.3)$$

また、導波路解析の際に用いられる等価屈折率 n_{eff} は、

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0} \quad (2.4)$$

y 方向の伝搬定数 k_y は

$$k_y = k_0 n_1 \cos \theta \quad (2.5)$$

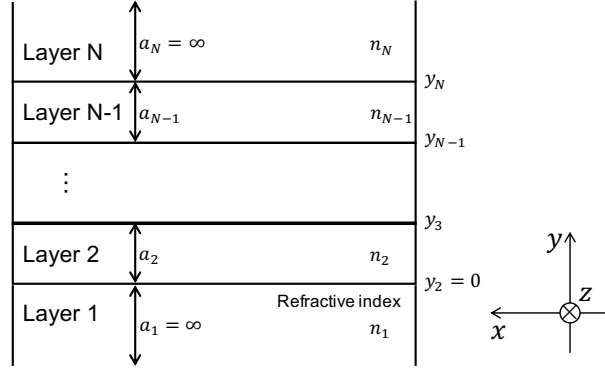


Fig. 2.1 Multi-layer slab waveguide.

反射部での位相シフトは、フレネルの式より次の通りである。

$$\phi_{TE} = 2 \arctan \left[\frac{\sqrt{\sin^2 \theta - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{\cos \theta} \right] \quad (2.6)$$

$$\phi_{TM} = 2 \arctan \left[\frac{\sqrt{\sin^2 \theta - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{\frac{n_2}{n_1} \cos \theta} \right] \quad (2.7)$$

TE 波と TM 波、それぞれについて y 方向に定在波を形成する条件は、固有方程式と呼ばれ、次のように表される。

$$2ak_0n_1 \cos \theta - 2\phi_{TE} = 2\pi N \quad (2.8)$$

$$2ak_0n_1 \cos \theta - 2\phi_{TM} = 2\pi N \quad (2.9)$$

ただし、 $N = 0, 1, 2, \dots$ とする。 $N = 0$ を基本モード、 $N \geq 1$ を高次モードと呼ぶ。

ここからは、本研究で使用した導波路解析の手法のうち、多層スラブのモード解析、等価屈折率法の原理を述べる [23]。

2.1.1 多層スラブのモード解析

Fig. 2.1 に示す、 z 軸方向に一様な多層スラブ導波路を z 方向に、角周波数 ω 、伝搬定数 β の光が伝搬していく場合を考える。電界 \tilde{e} と磁界 \tilde{h} は次の式で表される。

$$\tilde{e}(r, t) = E(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad (2.10)$$

$$\tilde{h} = H(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad (2.11)$$

媒質が x 方向に一様である場合、式 (2.10)、(2.11) をマクスウェル方程式に代入すると次の式が成立する。

$$-j\beta E_x = -j\omega\mu_0 H_y \quad (2.12)$$

$$-\frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \quad (2.15)$$

$$-j\beta H_x = j\omega\epsilon_0 n^2 E_y \quad (2.16)$$

$$-\frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \quad (2.17)$$

TE 波の波動方程式は、式 (2.13) を y で偏微分したもの、式 (2.13)、(2.14) より、次の通りである。

$$-\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k^2 - \beta^2) E_x = 0 \quad (2.18)$$

$$H_y = \frac{\beta}{\omega\mu_0} E_x \quad (2.19)$$

$$H_z = -\frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (2.20)$$

TM 波についても、同様にして次のように表される。

$$-\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + (k^2 - \beta^2) H_x = 0 \quad (2.21)$$

$$E_y = -\frac{\beta}{\omega\epsilon_0 n^2} H_x \quad (2.22)$$

$$E_z = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (2.23)$$

TE 波において i 層目での電界分布 E_{xi} 、TM 波において磁界分布 H_{xi} は式 (2.18)、(2.21) より、

$$E_{xi}, H_{xi} = A_i \exp[-jk_{yi}(y - y_i)] + B_i \exp[jk_{yi}(y - y_i)] \quad (2.24)$$

ただし、

$$k_{yi} = \sqrt{k_i^2 - \beta^2}, k_i = k_0 n_i \quad (2.25)$$

$y = \pm\infty$ での収束条件より、

$$B_1 = A_N = 0 \quad (2.26)$$

各層での境界条件より、TE 波について

$$E_{xi} = E_{x(i-1)}, H_{zi} = H_{z(i-1)} \quad (2.27)$$

TM 波について、

$$E_{zi} = E_{z(i-1)}, H_{xi} = H_{x(i-1)} \quad (2.28)$$

さらに、 $y = y_2, y_3, \dots, y_{N-1}$ での連続条件から、

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{i1} & c_{i2} \\ c_{i3} & c_{i4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{i-1} \\ B_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

ただし、TE 波に対して $m_i = 1$ 、TM 波に対して $m_i = \frac{n_i}{n_{i-1}}$ として、

$$c_{i1} = \frac{k_{yi} + k_{y(i-1)}m_i^2}{2k_{yi}} \exp(-jk_{y(i-1)}a_{i-1}) \quad (2.30)$$

$$c_{i2} = \frac{k_{yi} - k_{y(i-1)}m_i^2}{2k_{yi}} \exp(jk_{y(i-1)}a_{i-1}) \quad (2.31)$$

$$c_{i3} = \frac{k_{yi} - k_{y(i-1)}m_i^2}{2k_{yi}} \exp(-jk_{y(i-1)}a_{i-1}) \quad (2.32)$$

$$c_{i4} = \frac{k_{yi} + k_{y(i-1)}m_i^2}{2k_{yi}} \exp(jk_{y(i-1)}a_{i-1}) \quad (2.33)$$

$y = y_N$ での連続条件から、

$$\begin{bmatrix} B_N \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{N1} & c_{N2} \\ c_{N3} & c_{N4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{i-1} \\ B_{i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{N1} \\ B_{N2} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

ただし、TE 波に対して $m_N = 1$ 、TM 波に対して $m_N = \frac{n_N}{n_{N-1}}$ として、

$$c_{i1} = \exp(-jk_{y(N-1)}a_{N-1}) \quad (2.35)$$

$$c_{i2} = \exp(jk_{y(N-1)}a_{N-1}) \quad (2.36)$$

$$c_{i3} = -\frac{k_{y(N-1)}m_N^2}{2k_{yN}} \exp(-jk_{y(N-1)}a_{N-1}) \quad (2.37)$$

$$c_{i4} = \frac{k_{y(N-1)}m_N^2}{2k_{yN}} \exp(jk_{y(N-1)}a_{N-1}) \quad (2.38)$$

式 (2.34) より、 B_{N1} 、 B_{N2} は A_1 のみで次のように表せる。

$$\begin{bmatrix} B_{N1} \\ B_{N2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(\beta) \\ c_2(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_1 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$B_{N1} = B_{N2}$ より、次のように β を求められる式が導ける。

$$c_1(\beta) = c_2(\beta) \quad (2.40)$$

2.1.2 等価屈折率法

等価屈折率法は、3次元導波路を近似を用いて解析する代表的な手法の1つである。コアとクラッドの屈折率差があまり大きくなければ、比較的誤差が小さい解が得られること

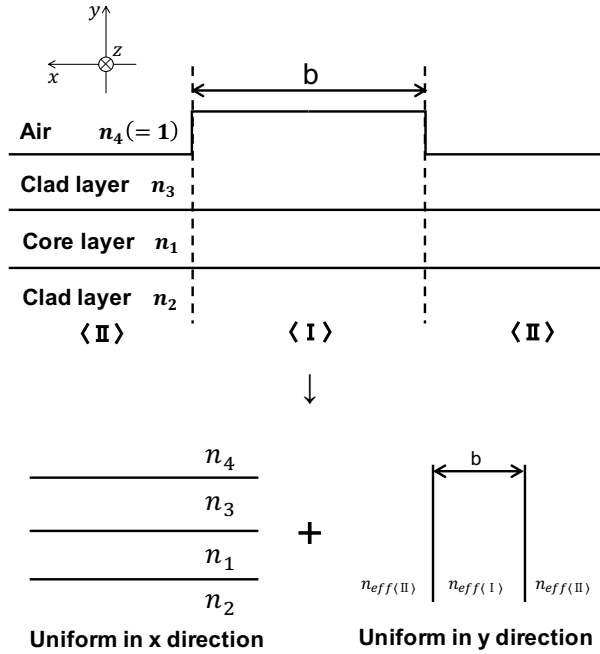


Fig. 2.2 Analysis of ridge waveguide by effective index method.

が知られている。ここからは、リッジ型導波路を等価屈折率法によって解析する方法を述べる。Fig. 2.2 に概要を示す。

まず、電界が水平方向である TE モードに対しての結果を求める場合を考える。 x 方向に一樣な領域 $\langle I \rangle$ 、 $\langle II \rangle$ の TE 波に対する等価屈折率 n_{eff} を前小節に述べた方法で求める。次に、方向を変えて y 方向に一樣な 3 層のスラブ導波路として、前小節の TM 波に対する計算を行うことで、求める TE モードの伝搬定数や等価屈折率を求められる。TM モードについての結果を求めるのも同様に、領域 $\langle I \rangle$ 、 $\langle II \rangle$ の TM 波に対する等価屈折率を求め、方向を変えて 3 層スラブ導波路として TE 波に対する等価屈折率を計算する。

2.2 光フェーズドアレイ

2.2.1 位相変調器による光ビーム偏向

光フェーズドアレイの光ビーム偏向は、主にアレイ状に並んだ各導波路につけられた位相変調器によって行われている。定性的な理解においてはホイヘンスの原理を用いて考える。Fig. 2.3 にそのイメージ図を示す。多数の導波路から出射された球面波の同位相となる部分に共通して接する面の向きにビーム偏向される。上の図はフェーズドアレイの導波路の出射端の部分で各位相が揃っている場合で、出射端面に対して鉛直方向へ伝搬される。下の図は隣り合う導波路の位相差が γ となるように位相変調を行った場合である。このとき、遠視野と呼ばれる十分離れた領域で観測される集光位置は、 x 軸上の別の点に移動す

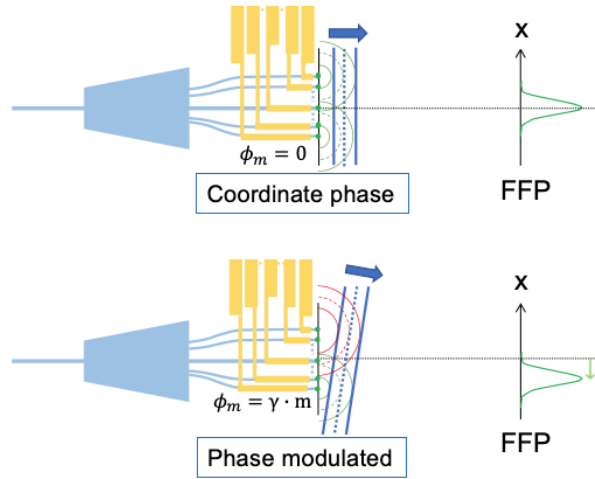


Fig. 2.3 Beam-steering by phase-tuning the waveguide array.

る。定量的にその特性を計算で求める場合、フラウンホーファー回折の式を用いて議論される。光フェーズドアレイ素子の評価指標として、アレイ本数が重要視されるが、これは解像点数がアレイ本数とおよそ一致するためである。光フェーズドアレイ素子の実用化を視野に入れると、アレイ本数 N は 100 以上必要と言われている。

2.2.2 2次元ビーム偏向

1つの軸方向のビーム偏向に関しては、ここまで述べた位相変調器による方法が取られることが多い。本研究は1次元のスキャンニング目的の素子のため、位相変調器のみでビーム偏向が達成されるが、2次元スキャンニング・イメージングへ拡張を行う場合は、もう1つの軸方向にもビーム偏向を行う必要がある。2次元アレイを導入する方法、波長掃引を用いた方法などが報告されている。

2次元アレイの導入

1次元のフェーズドアレイでは、導波路の出射端は Fig. 2.3 のような1次元（直線）上に配置されていた。Fig. 1.7 の Si を用いた2次元アレイ型の光フェーズドアレイ素子がその一例である [4]。導波路の出射端を2次元アレイ型に並べることで、熱光学効果による位相変調のみで2次元ビーム掃引を達成している。

回折格子の集積による波長掃引

回折格子の集積による波長掃引のビーム偏向を考えるにあたって、Fig. 2.4 のような構造を仮定する。

ブラッグの回折条件より、回折格子の等価屈折率 n_{eff} と入射光の波長 λ を用いて、次の

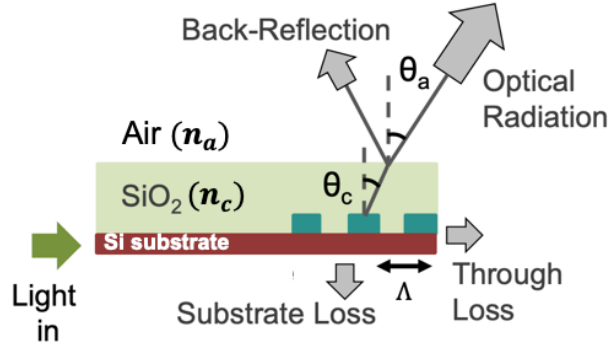


Fig. 2.4 Bragg reflection at the grating coupler [24].

式 (2.41) が成り立つ。

$$n_c \sin \theta_c = n_{eff} - \lambda / \Lambda \quad (2.41)$$

スネルの法則より、空気層への出射角 θ_a は次の通りである。

$$\sin \theta_a = \frac{n_c}{n_a} \sin \theta_c = \frac{\Lambda n_{eff} - \lambda}{n_a \Lambda} \quad (2.42)$$

式 (2.42) より、入力光波長 λ を動的に変化させることで、構造的に可能な範囲において空気層への出射角 θ_a を制御できる。

2.3 位相変調の原理

光フェーズドアレイの位相変調は、位相変調器部分の屈折率を変化させ、光路長を変化させるという仕組みになっている。屈折率変化の原理として、熱光学効果、キャリア効果、電気光学効果などが知られているが、今回設計を行う GaAs/InGaP 光フェーズドアレイにおいては、主にキャリア効果を利用して変調を行っている。

2.3.1 クラマース・クロニッヒの関係式

次項以降で説明するような屈折率変化の原理においては、実行的なバンドギャップを変化に伴って、吸収スペクトルが変化し、同時に屈折率スペクトルの変化が起こる。光の吸収と屈折は切り離せない関係を持つ現象である。一般に線形応答において、周波数応答関数の実部と虚部はクラマース・クロニッヒの関係式 (Kramers–Kronig relation; KKR) によって関連付けられる。

ここで、電界 E に対する電子分極 P は複素感受率 χ は次のような関係となる。

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (2.43)$$

これは線形の周波数応答を示す式であるので、クラマース・クロニッヒの関係式に複素感受率 χ を代入すると、 χ の実部 χ_r と虚部 χ_i の関係式は次式のように相互に関係づけら

れる。

$$\chi_r(\omega) = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\chi_i(\omega')}{\omega - \omega'} d\omega' \quad (2.44)$$

$$\chi_i(\omega) = -\frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\chi_r(\omega')}{\omega - \omega'} d\omega' \quad (2.45)$$

ここで P.V. はコーシーの主値である。

複素屈折率 n_c について、 $n_c = n - j\kappa$ と置く。ここで n_c の虚部である κ は減衰を表す変数であり、吸収係数 α で表すと次式となる。

$$\kappa = \frac{c\alpha}{2\omega} \quad (2.46)$$

χ が $\Delta\chi$ 変化した場合の n_s の変化量を Δn_s と置くと、テイラー展開より次式が成立する。

$$\begin{aligned} \Delta n_s &= (\sqrt{1+\chi} + \frac{\Delta\chi}{2\sqrt{1+\chi}} - \frac{\Delta\chi^2}{8\sqrt{1+\chi}^3} + \dots) - \sqrt{1+\chi} \\ &= \frac{\Delta\chi}{2n_s} - \frac{\Delta\chi^2}{8n_s^3} + \dots \end{aligned} \quad (2.47)$$

この式より、 n_s に対して $\Delta\chi$ が微小であるとみなせる領域において、 $\Delta\chi$ と $\Delta\chi$ は線形と近似できることが読み取れる。これと式 (2.46) より、屈折率の変化量 Δn_s と吸収係数の変化量 $\Delta\alpha$ にも近似的にクラマース・クロニツヒの関係式が成立する。クラマース・クロニツヒの関係式の積分区間を書き換えることで、次式が導かれる。

$$\Delta n(\omega) = \frac{c}{\pi} P.V. \int_0^{\infty} \frac{\Delta\alpha(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.48)$$

位相変調器においては、光のエネルギーはバンドギャップよりも小さく、吸収が少ない領域を考える。バンドギャップの変化による吸収の変化を考える場合、バンドギャップ付近の変化が大きい。式 (2.48) では $\omega < \omega'$ の領域である。ゆえに、バンドギャップ付近において吸収係数の変化と屈折率変化は同じ方向に変化する。バンドギャップの変化でまとめて表すと、バンドギャップが小さくなると吸収係数と屈折率が共に増加し、バンドギャップが大きくなると吸収係数と屈折率は共に減少する。

2.3.2 熱光学効果

熱光学効果は、熱膨張で格子間隔が変化することによって生じる屈折率変化のことを指す。

ある材質の絶対温度 T とバンドギャップ $E(T)$ の関係は、Varshni の経験則として知られている。0 K でのバンドギャップを $E(0)$ 、材料特有の 2 つのパラメータを α, β として次の式で表される [25]。

$$E(T) = E(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2.49)$$

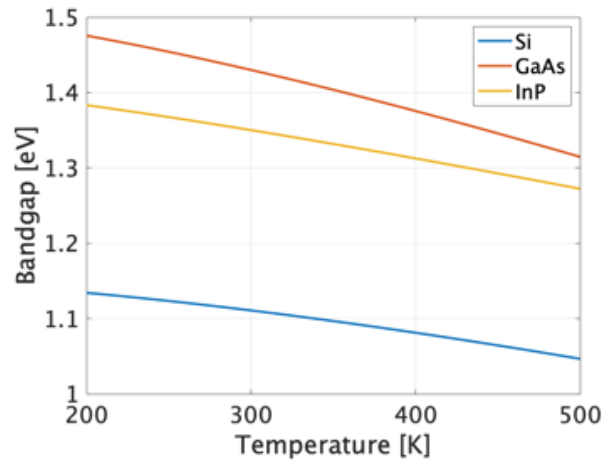


Fig. 2.5 Variation of the energy gap with temperature.

Si、GaAs、InP の 3 つについて、式 (2.49) をプロットした結果を Fig. 2.5 に示す。温度 T の上昇に伴って、バンドギャップは小さくなり、クラマース・クロニツヒの関係式より屈折率は大きくなる。

熱光学効果の応答速度は熱の移動に依存するため、これ以降述べる位相変調方法と比較すると、数 ms と比較的低速であるが、幅広い種類の材質で利用できるという利点もある。

2.3.3 キャリア効果

キャリア効果は、半導体のキャリア密度の変化によって生じる屈折率変化のことを指す。キャリア密度を変化させるため、ダブルヘテロ構造に順バイアスを加えてキャリア注入を行う方法が取られる。

キャリア効果には、バンドフィリング効果、バンドギャップ収縮効果、自由キャリアプラズマ効果の 3 つがある [26]。

バンドフィリング効果は、キャリア密度が高くなった場合の実効的なバンドギャップ増加による屈折率変化である。伝導帯下端の準位が埋まると、価電子帯の電子は伝導帯下端の準位に遷移することができず、より上の準位へと遷移するほかない。これが実効的にバンドギャップが増加した状態となり、クラマース・クロニツヒの関係式より屈折率が減少する。

バンドギャップ収縮効果は、伝導帯下端に密集したキャリアのクーロン力による反発が高まり、伝導帯下端の準位が下がることで、実効的なバンドギャップが減少することで、クラマース・クロニツヒの関係式より屈折率が増加する。

自由キャリアプラズマ効果は、キャリアの増加に伴って、バンド内遷移による光吸収が増加することによる変化であり、クラマース・クロニツヒの関係式より屈折率は増加する。

バンドフィリング効果とバンドギャップ収縮効果は、バンドギャップ付近の吸収スペク

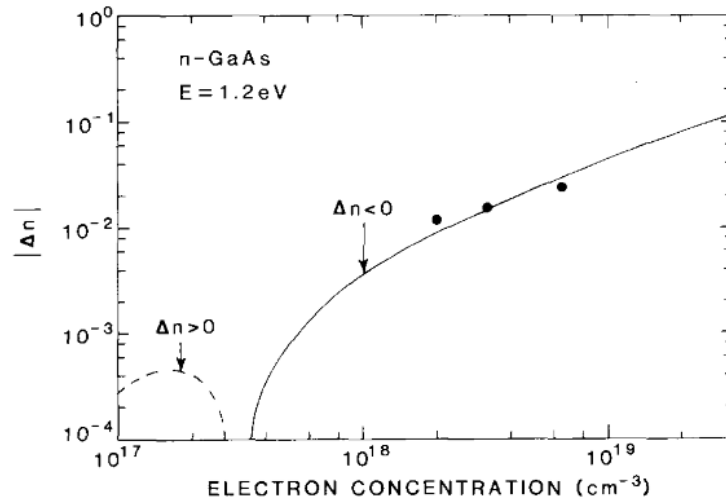


Fig. 2.6 Changes in refractive index from carrier effect (sum of all three effects) for injection into n-GaAs at 1.2 eV [26].

トル変化による効果であるため、クラマース・クロニツヒの関係式より、バンドギャップ付近での屈折率変化が大きくなるという特徴がある。この原理より、バンドギャップ変化の影響が小さい Si や Ge などの間接遷移半導体では、これらの効果は小さい。一方、自由キャリアプラズマ効果は吸収のスペクトル依存性が小さいため、屈折率変化の波長依存性も小さい。間接遷移半導体においては、自由キャリアプラズマ効果が支配的となる。

GaAs の場合に、これら 3 つの効果による屈折率変化の合計を示したものが、Fig. 2.6 である。

2.3.4 電気光学効果

電気光学効果は、半導体に電圧が印加された場合に発生する屈折率変化のことを指す。1 次の電気光学効果はポッケルス効果と呼ばれ、屈折率変化は電界強度に比例する。2 次の電気光学効果はカー効果と呼ばれ、電界強度の 2 倍に比例する。フェーズドアレイの位相変調に電気光学効果が使用される場合、一般的にカー効果はポッケルス効果と比べて非常に小さいので、ポッケルス効果について述べる。

ポッケルス効果は、2 次の非線形光学効果の 1 つとして知られ、結晶の中心対称性がない InP や GaAs などの物質において見られる効果である。同じ結晶においても、電圧を印加する結晶方位が異なれば、その屈折率変化の大きさも異なる [18]。

第 3 章

GaAs/InGaP 光フェーズドアレイの設計

材料として InGaP/GaAs/InGaP のダブルヘテロ構造を用い、高速位相変調可能なキャリア効果駆動の位相変調器を組み込む。数値計算によって、基板の層構造、導波路構造、位相変調器および 1×25 光フェーズドアレイ素子のパタメータを決定し、レイアウトの設計を行った。それに加えて、位相変調特性の評価用素子のレイアウトの設計を行った。本章では、波長 $1 \mu\text{m}$ の入力光を想定したこれらの素子の設計について述べる。

3.1 基板層構造

GaAs をコア層として用いる場合、AlGaAs などの Al 系化合物がクラッドとして使用されるが、酸化されやすく大規模化を妨げる要因となる。大規模化を考えると、Al を含まない材料を使用することが望ましい。そこで本研究では、クラッドとして GaAs に格子整合する InGaP を用いる構造を提案する。

まず、GaAs に格子整合する InGaP について述べる。InGaP のバンドギャップと格子間隔の関係を Fig. 3.1 に示す。GaAs に格子整合する InGaP の組成は $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ である。なお、波長 1000 nm の光に対する屈折率について、GaAs は 3.50、 $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ は 3.22 である [27]。

GaAs に格子整合する InGaP のクラッド層で GaAs のコア層を上下から挟み込むような構造を GaAs 基板上に成長する。その構造を Fig. 3.2 に示す。

Fig. 3.2 に示す構造に対して、GaAs コア層の厚みを求める。波長 1000 nm における縦方向スラブ導波路モード解析の結果を Fig. 3.3 に示す。この結果より、GaAs コア厚は単一モード条件を満たす上限値に近い 360 nm とした。この場合の TE_0 モードの等価屈折率は 3.4023 である。

表面から裏面に向かって電流注入を行うことを想定し、Fig. 3.4 に示すダブルヘテロ接合

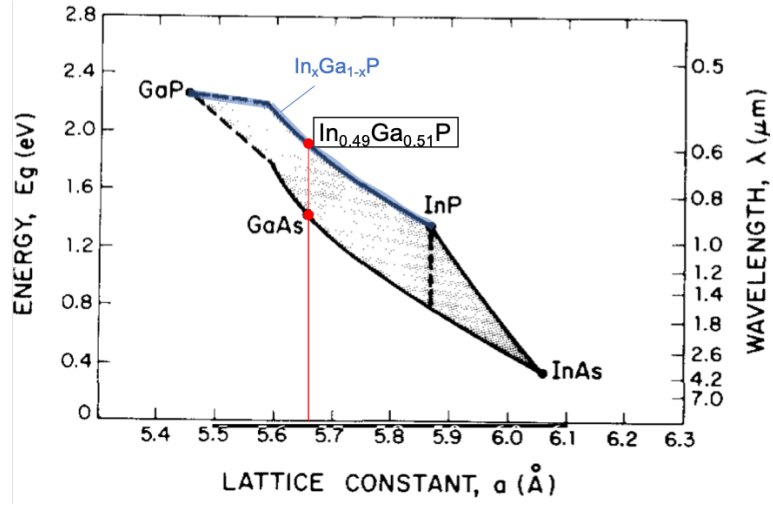


Fig. 3.1 Bandgap and lattice constant for InGaP [28].

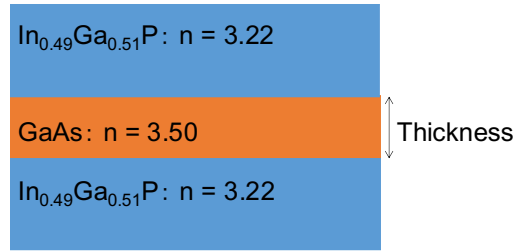


Fig. 3.2 Slab waveguide layer structure.

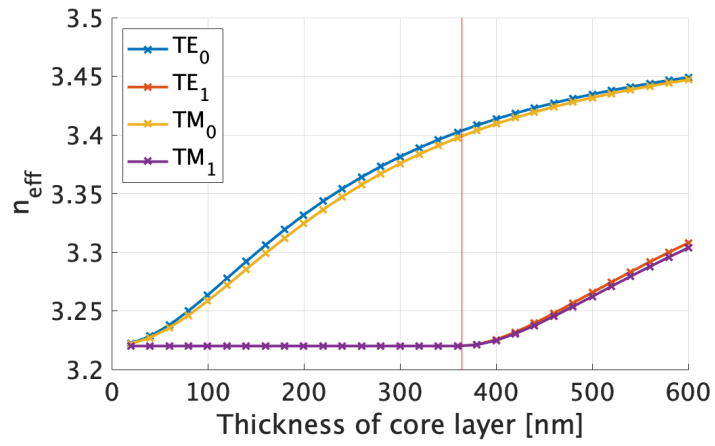


Fig. 3.3 Thickness of core layer analysed by multi-layer slab waveguide analysis.

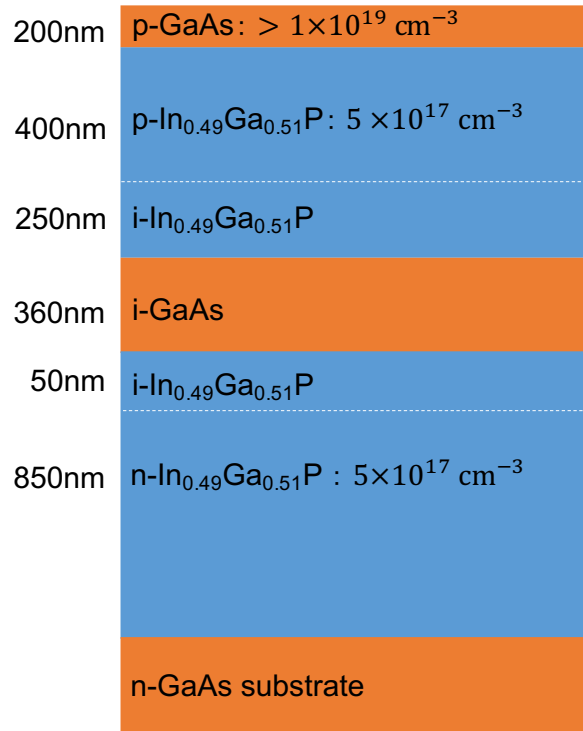


Fig. 3.4 Epitaxial wafer layer structure.

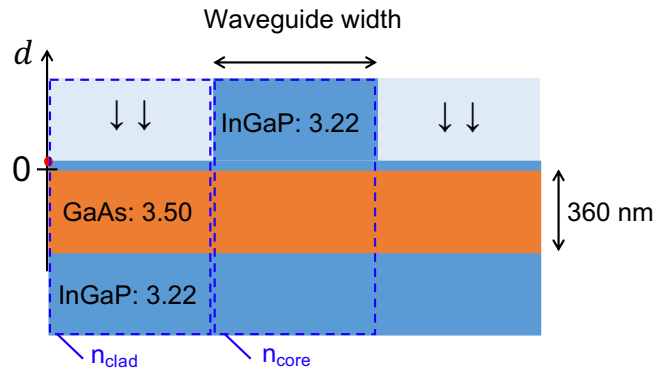


Fig. 3.5 Waveguide structure.

の層構造に決定した。 cm^{-3} で示されているのはドーピング濃度を表す。一番上の p-GaAs 層はコンタクト層で、位相変調器部分において電極との接触比抵抗を小さくするために、ドーピング濃度を可能な範囲で高める必要がある。

3.2 導波路構造

二次元的な導波路構造を決定するため、等価屈折率法を用いてモード解析を行った。Fig. 3.5 に示すリッジ導波路について、クラッド部分のエッチング深さを考える。

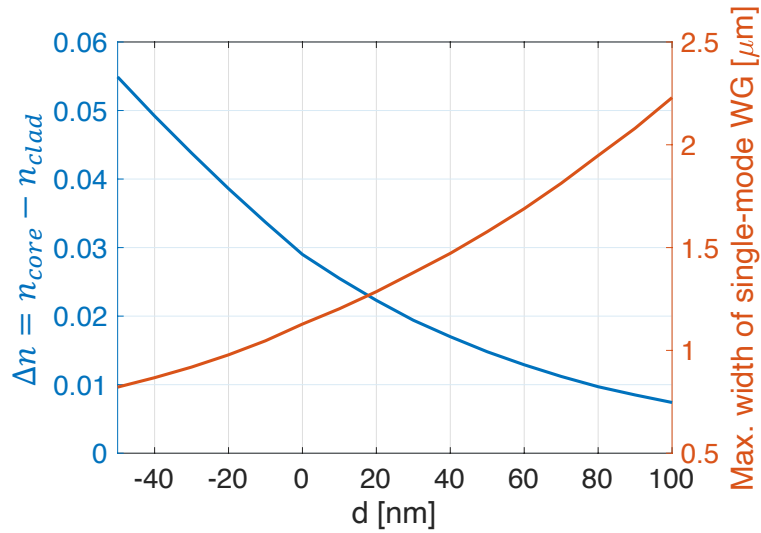


Fig. 3.6 Etching depth and Δn , width of single-mode waveguide.

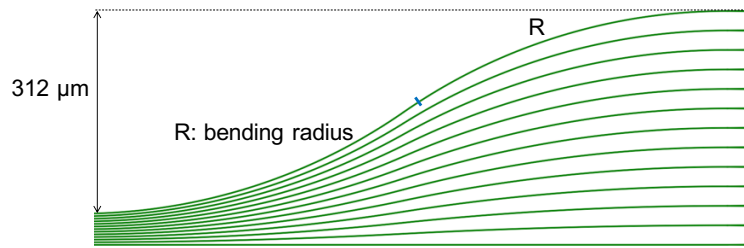


Fig. 3.7 Enlarged view of bending part of 1×25 OPA device.

コア層とクラッド層の上側境界からエッチングされた表面までの距離（上方向を正）を d と置き、 d を変化させた場合の、コア部分とクラッド部分の等価屈折率差 Δn をスラブ光導波路解析により求め、等価屈折率法により、TE 光に対して単一モード条件を満たす導波路幅の最大値を計算した。その結果を Fig.3.6 に示す。なお、コア層の屈折率 n_{core} は前節で求めた通り 3.4023 である。

さらに、エッチング深さは曲げによる損失も考慮して決定する必要がある。フェーズドアレイにおいて、位相変調器の部分は後述する理由から導波路間隔を広げる必要があるため、その部分で導波路を曲げる必要がある。今回の素子では曲げ導波路部分は 2 つの円弧を組み合わせた形状とし、その拡大図を Fig. 3.7 に示す。ビームスプリッタであるスターカプラの出力部の導波路間隔は、この時点ではフォトリソグラフィによるパターニングを想定していたため、 $4\mu\text{m}$ とした。また、位相変調器部分の平行な導波路間隔は、素子サイズを考えると小さい方が良いが、狭すぎると作製の際に隣接する電極が繋がってしまうリスクがあるため、作製実績から $30\mu\text{m}$ に設定する [29]。したがって、導波路本数 25 本のフェーズドアレイ素子において、最も曲げ損失が大きくなる外側の導波路は Fig. 3.7 のように $312\mu\text{m}$ 広げる必要がある。この場合に曲げ半径を $R[\mu\text{m}]$ 、1 つ円弧の中心角を θ と

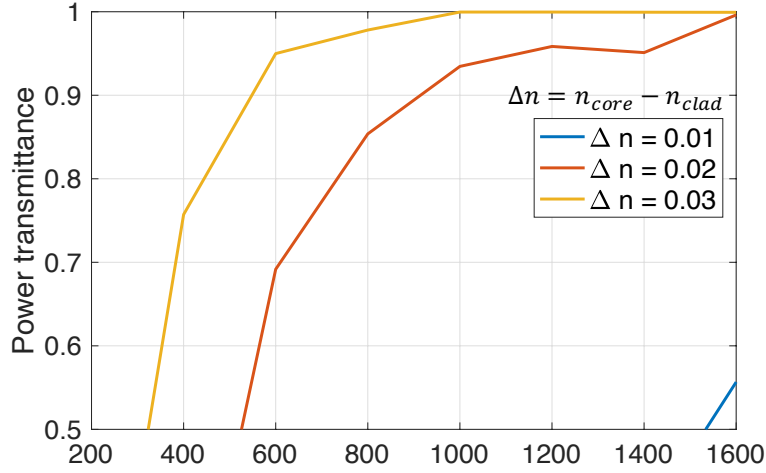


Fig. 3.8 Bending radius and power transmittance.

おくと、次の式を満たす。

$$\theta = \arccos\left(1 - \frac{156}{R}\right) \quad (3.1)$$

各 Δn に対して、最も曲率が大きな外側の導波路の曲げ半径 R と曲げ前後のパワー比を、有効屈折率近似と二次元有限差分ビーム伝搬法（2D FD-BPM）により計算した。結果を Fig. 3.8 に示す。

コア部とクラッド部の等価屈折率差 Δn が大きいほど曲げ損失が小さくなるが、 Δn が大きすぎると Fig. 3.6 より高次モードが励起され易いというトレードオフの関係がある。これらを考慮して、 $\Delta n = 0.02$ とし、Fig. 3.6 より d は 20 nm、曲げ半径 R は 1200 μm とする。導波路幅は単一モード条件を満たすことが望ましいが、フォトリソグラフィによるパターンニングを想定していたため、2 μm とした。

採用した導波路幅とエッチング深さの場合の基本導波モードの 2 次元電界強度分布を有限差分固有モード法で計算した結果を Fig. 3.9 に示す。算出されたコア層への光の閉じ込め係数は 0.85 である。

3.3 位相変調器の構造

3.3.1 位相変調器長

位相変調量を θ 、活性層であるコア層への光の閉じ込め係数を Γ 、位相シフタにおける屈折率変化を Δn 、入力波長を λ 、位相変調器長を L とすると、以下の式が成立する。

$$\theta = \frac{2\pi\Gamma\Delta nL}{\lambda} \quad (3.2)$$

また、発振閾値前のレート方程式において、自然放出の項が支配的である場合、以下の

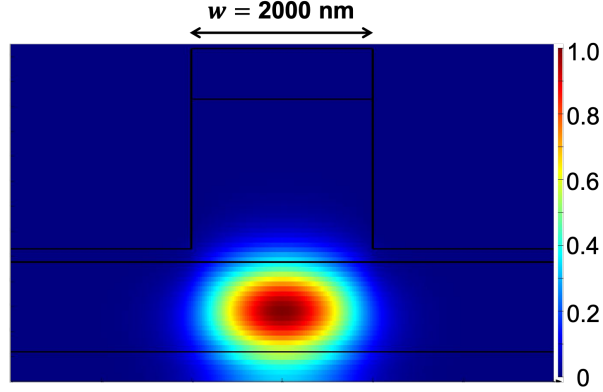


Fig. 3.9 2D electric field distribution calculated by finite difference eigenmode (FDE) solver.

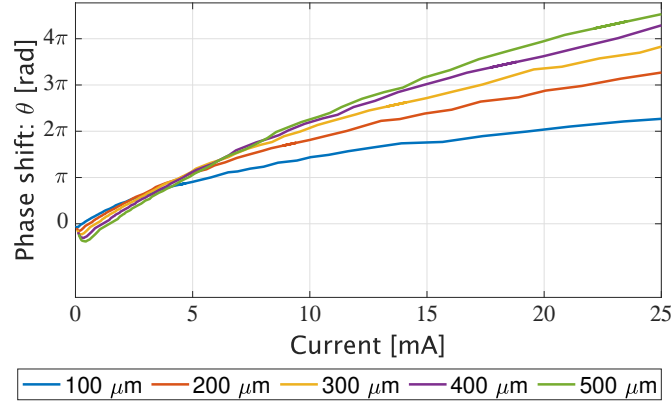


Fig. 3.10 Injected current flow rate and phase modulation amount.

近似が成立する。

$$\frac{\eta_i I}{qV} \sim BN^2 \quad (3.3)$$

ここで I は電流値、 η_i は電流注入効率、 q は電気素量、 V は活性領域体積、 B はアインシュタインの B 係数、 N はキャリア密度である。

電流注入効率 η_i を 0.80 と仮定し、 B を文献値より $2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ [30] とし、 I と N の関係を計算した。さらに、Fig. 2.6 の GaAs キャリア密度 N と屈折率変化 Δn を利用して、(3.2) 式より位相変調量 θ を計算した。ただし、モード解析の結果より光閉じ込め係数 Γ は 0.85 とした。各位相変調器長に対して計算した結果を Fig. 3.10 に示す。この結果より、導波路幅 $2 \mu\text{m}$ 、導波路長 $400 \mu\text{m}$ の位相変調器において、9 mA で 2π の位相変調が得られることがわかる。

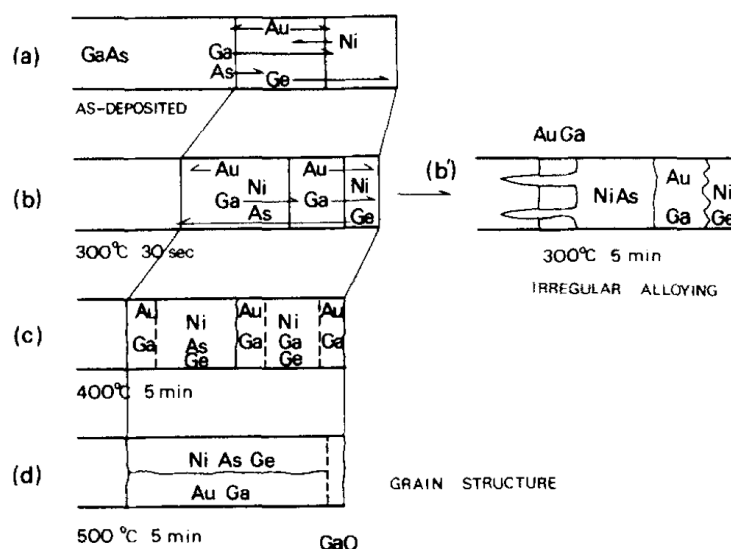


Fig. 3.11 Ni/AuGe/GaAs contact system alloying behavior [35].

3.3.2 電極に使用する金属

金属電極と半導体の間の接触抵抗が小さく、オーミック電流が流れる状態をオーミックコンタクトと呼ぶ。今回の素子の位相変調器部分に使用する電極の金属について、良好なオーミックコンタクトを得られるかを考慮して選定する必要がある。半導体基板表面を高濃度にドーピングして空乏層を薄くし、トンネル効果によってキャリアが障壁を乗り越えられるようにすることで、オーミックコンタクトが得られるという考え方が取られる。層構造設計の節でも述べた通り、空乏層幅は不純物濃度の平方根に反比例するため、結晶成長の際はコンタクト層の不純物濃度を上げておくことが望ましい [31]。

n 型 GaAs と p 型 GaAs へオーミックコンタクトを得られる電極として、本研究室内でも使用実績があるものを選定して使用した [32–34]。

n 型 GaAs へのオーミックコンタクト

Ni/AuGe/GaAs の合金を用いた。GaAs 上に 12% の Ge を含んだ Au を真空蒸着し、その上から Ni を成膜する。その後、熱処理を行うことで合金が生成され接触抵抗が低下する。合金化の反応の模式図を Fig. 3.11 に示す。およそ 400 °C で (c) のような安定な合金になるが、急速な昇温ができないと (b') のように不規則な構造になり特性が悪くなる。また、熱処理の時間が長すぎるあるいは温度が高すぎると、逆に接触比抵抗が大きくなってしまうため、注意が必要である [35]。

p 型 GaAs へのオーミックコンタクト

p 型 GaAs を n 型 GaAs と比較すると、金属とのショットキー障壁の高さが低く、Zn などのアクセプタが高濃度でドーピングされていることから、比較的オーミックコンタクトが取りやすい。p 型 GaAs にドーピングされた Zn の表面濃度が 10^{19} cm^{-3} 程度より大きい場合、ほとんどの金属に対してオーミックコンタクトが成立する。本研究では、Ag/Au を用いた。ここでも熱処理による合金化を行うと、オーム性が改善され接触比抵抗が小さくなる [32]。

3.4 1×25 光フェーズドアレイ素子の設計

ここまでで決定した構造を用い、導波路本数 25 の GaAs/InGaP フェーズドアレイ素子の設計を行った。

3.4.1 スターカプラ長

ビームスプリッタであるスターカプラの伝搬方向の長さを決定する。スターカプラ長が長いほど、解像点数に影響する導波路間の光強度比が均一になるが、損失が増大する。つまり、導波路結合後の光強度と損失がトレードオフの関係にある。この関係を考慮して、スターカプラ長を $1000 \mu\text{m}$ とした。Fig. 3.12 に、スターカプラ長が $1000 \mu\text{m}$ の場合のスターカプラの出力部での光強度（赤）および 25 本の導波路に結合後の光強度（青）を、ビーム伝搬法を用いて計算した結果を示す。さらに、この場合の遠視野像（FFP）を、導波路モードをガウス関数に近似することで計算した結果を Fig. 3.13 に示す。ビーム掃引可能な範囲を示す FSR (Free Spectral Range) は 1.91 deg 、ビーム幅（半値全幅）は 0.071 deg となった。光フェーズドアレイのビーム掃引における解像点数は、FSR を半値全幅で割ったもので評価され、理論的には導波路本数程度になることが知られている。計算結果から求めた解像点数もこの理論通りの結果となった。

3.4.2 全体のレイアウト

設計した 1×25 光フェーズドアレイ素子のマスクパターンを、Fig. 3.14 に示す。これまでの数値解析によって決定したパラメータの一覧を Table 3.1 に示す。次章で説明する作製プロセスにおいて、導波路パターン、位相変調器部分を覆うウィンドウパターン、電極パターン、実装の際ワイヤーボンディングの中継地点となる電極パッドパターンの 4 層が必要になる。素子の大きさは $1.6 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$ で、この大きさで導波路本数 25 の光フェーズドアレイ素子の実現できることを数値計算によって示した。また、この素子全体の消費電力は 400 mW 程度と見積もられた。

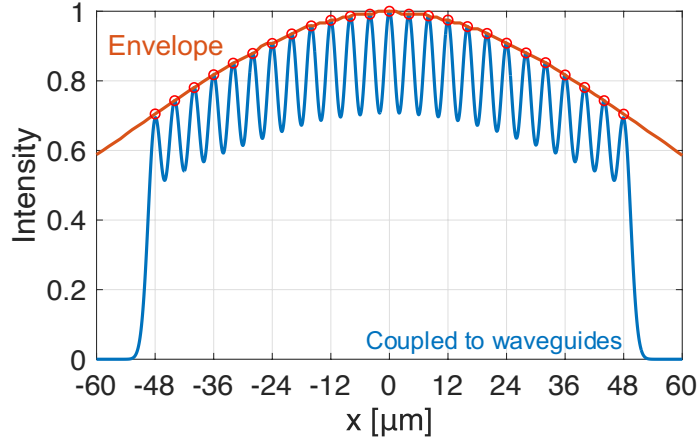


Fig. 3.12 Power intensity at the output of the star coupler calculated by beam propagation method.

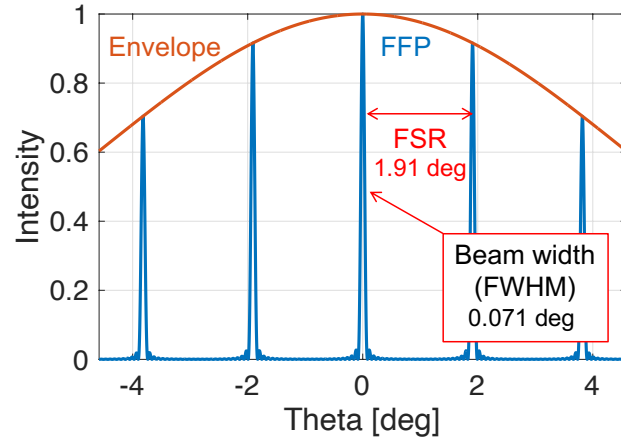


Fig. 3.13 Far field pattern (FFP) calculated by approximating the waveguide modes with a Gaussian function.

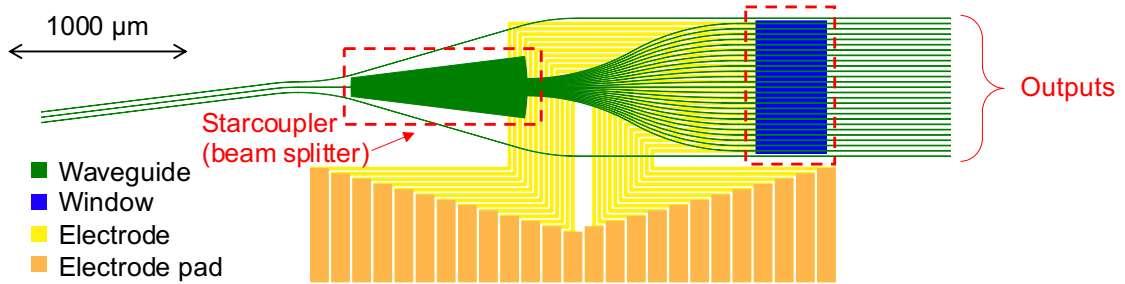


Fig. 3.14 Mask patterns of 1×25 Optical phased array device.

Table 3.1 Parameters of 1×25 GaAs/InGaP optical phased array device.

Parameter	Value
Input wavelength	1 μm
Number of waveguides	25
Width of passive waveguides	2 μm
Width of phase shifter	4 μm
Length of star coupler	1000 μm
Length of phase shifter	400 μm
Interval between waveguides at output of star coupler	4 μm
Interval between waveguides at phase shifter	30 μm
Bending radius	1200 μm
FSR	1.91 deg
Beam width (FWHM)	0.071 deg

3.5 位相変調器の特性評価用素子の構成

次に述べる 2 つの理由から、光フェーズドアレイ素子の作製を行う前に導波路や位相変調器の特性評価のための素子を作製することとした。1 つ目の理由としては、本研究室では GaAs/InGaP での光導波路の作製経験がなく、作製プロセスの確立が必要であったからである。素子作製の基本的な工程としては、InP 系のフェーズドアレイのものを踏襲しているが、導波路のエッチングに関しては条件が全く異なるため、条件出しを行う必要がある。2 つ目の理由は、文献値から見積もった電流注入による位相変調特性を実験によって確認するためである。位相変調器の特性は、類似の構造であっても作製方法が異なると大きく異なるということが知られている [29]。

設計した特性評価用素子のマスクパターンを Fig. 3.15 に示す。4 種のマスクパターンの構成は 1 × 25 フェーズドアレイ素子のものと同様である。このマスクパターンには、パッシブ導波路、対称/非対称マッハツェンダー干渉計、直線位相変調器が含まれている。非対称のマッハツェンダーを用いると、電流注入し位相変調が起こる際の透過スペクトルのピーク位置の移動方向を観測することで、位相変調器の屈折率変化の正負を判別できる。よって、その際の位相変調の原理が今回期待されるバンドフィリング効果によるものかどうか特定することができる。非対称マッハツェンダーの透過スペクトルのピーク位置間隔 $\Delta\lambda$ は FSR (Free Spectral Range) と呼ばれ、次の式で求められる [36]。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta L n_g} \quad (3.4)$$

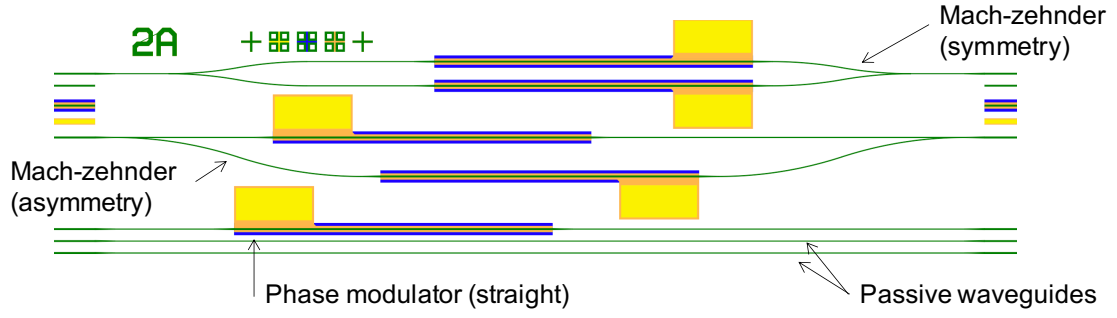


Fig. 3.15 Mask pattern of devices for evaluating the characteristics of phase modulators.

ただし、 λ は入力光波長、 ΔL は分岐した 2 つの導波路の光路長差である。 n_g は群屈折率で、次の式で表される。

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (3.5)$$

設計したパターンにおいて、光路長差は $19 \mu\text{m}$ であるから、 $\text{FSR}\Delta\lambda$ は 16 nm 程度となる。

作製誤差を考慮し、導波路幅は $2 \mu\text{m}$ と $2.5 \mu\text{m}$ を用意した。また、位相変調器部分の導波路幅も $3 \mu\text{m}$ と $3.5 \mu\text{m}$ の 2 つを置いた。さらに、位相変調器長は $200 \mu\text{m}$ 、 $400 \mu\text{m}$ 、 $600 \mu\text{m}$ 、 $800 \mu\text{m}$ 、 $1000 \mu\text{m}$ の 5 つを配置した。結合損を小さくするため、出入力部分の導波路幅はテーパー構造を用いて $4 \mu\text{m}$ に広げた。

第 4 章

半導体プロセス

4.1 半導体プロセス技術

4.1.1 薄膜作製技術

薄膜の作製は本研究のようなエレクトロニクス分野のみならず、ありとあらゆる産業や工業において非常に重要な技術である。気体からの凝縮を用いた薄膜作成方法は気相成長法と呼ばれ、PVD と CVD の 2 つに分けられる。

PVD (Physical Vapor Deposition : 物理蒸着法) は主に物理的な変化を利用する方法である。ターゲットとなる固体材料を高温で気体化させ、物理的に基板表面に凝集させることで成膜を行う。

一方、CVD (Chemical Vapor Deposition : 化学気相成長法) は主に高温における化学反応を利用する方法で、高温の基板上で膜の原料となるガスを反応させ成膜する。成膜反応の全体の流れは次のとおりである [37]。

- (1) 反応ガスを基板表面に均一になるように拡散させる
- (2) ガスを基板表面へ吸着させる
- (3) 基板表面で化学反応させる
- (4) 副生成ガスを脱離させる

ここからは薄膜作製法として代表的なものの中から、本研究で利用したものの原理を詳しく記す。PVD に分類されるスパッタリングと真空蒸着法、CVD に分類されるプラズマ CVD と MOCVD について述べる。

スパッタリング

スパッタリングは、真空中でイオン銃やプラズマによって加速したイオンをターゲットに衝突させることで、ターゲットの粒子を基板に飛散させて成膜を行う方法である。粒子は様々な方向へ飛散していくため、堆積の指向性がない。スパッタリングにおいては、円

盤状のターゲット全面から粒子を飛散させることができるため、均一性を担保するために真空チャンバーを大きくする必要はなく、短時間で成膜を行うことができる。また、真空蒸着よりも飛散してきた粒子のエネルギーが大きいため、基板への密着性がよい。

真空蒸着法

真空のチャンバー内で、金などの金属や酸化アルミニウム（アルミナ）などの酸化物を熱して蒸発させて、それを基板に付着させることで成膜を行う。蒸着源の加熱方法から、抵抗加熱型蒸着と電子線蒸着などの種類がある。前者と比較すると、後者は電子線により局所的な加熱が可能であるため、より融点の高い材料を蒸着することができる。本研究においても電子線による方法を採用した。

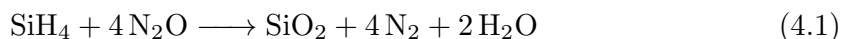
このプロセス単一で蒸着を行うだけであれば1次元方向の加工であるが、蒸着前にリソグラフィを行い、蒸着後にリフトオフと呼ばれるプロセスを行うことで2次元のパターニングが可能となる。リフトオフによって、リソグラフィによってレジストがある部分に堆積した物質は取り除かれ、レジストがない部分だけ堆積させた物質が残るといった仕組みである。

ターゲットと基板の位置関係（向き）による堆積の指向性が大きいことが特徴であり、斜めに蒸着させると堆積する部分としない部分が生じる。また、真空チャンバーの大きさは大きいほど膜厚の均一性は高くなるが、その分真空引きに時間がかかるという関係がある。

プラズマ CVD

CVD のなかでも、反応をより低温で行うためにプラズマを用いたものをプラズマ CVD (Plasma Enhanced CVD : PECVD) と呼ぶ。常圧 CVD や低圧 CVD などでは、基板表面でガスを反応させるために数百 °C 以上までの加熱が必要であるが、プラズマ CVD では活性化したプラズマによって化学反応が促進されるため、比較的低温で成膜が行える。一例として Si_3N_4 の場合、従来法では 1000 °C 程度であるが、プラズマ CVD では 400 °C 程度となる [37]。

本研究では SiO_2 の成膜にプラズマ CVD を使用した。原料ガスにはシラン (SiH_4) と亜酸化窒素 (N_2O) を用い、下記のような反応で成膜を行った [38]。



MOCVD

反応ガスとして III-V 族有機金属気体を用いた CVD 法を、有機金属気相成長法 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition : MOCVD) と呼ぶ。MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) とも呼ばれる。原料がすべて気体の状態で反応領域に運ばれるため、原料の供給量を精度良くコントロールできる。本研究室で使用されている装置を Fig. 4.1 に

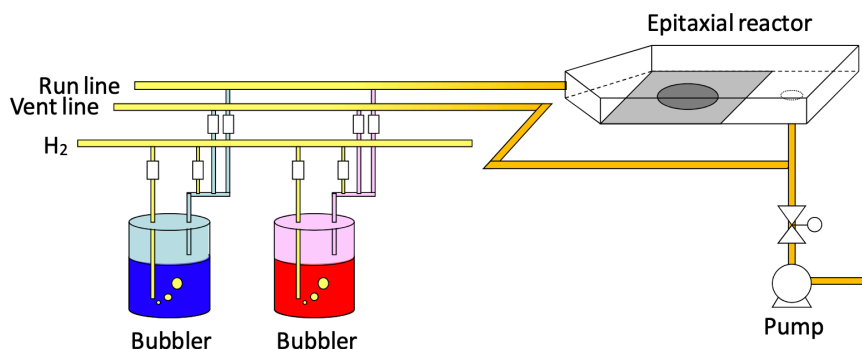


Fig. 4.1 Schematic of MOCVD system installed in our laboratory [39].

示す。

GaAs の場合について述べる。Ga の原料はトリメチルガリウム (TMG) やトリエチルガリウム (TEG)、As の原料はトリブチルアリシン (TBA_s) や気体のアルシン (AsH₃) が用いられる。TMG や TEG、TMA_s は常温で液体だが、バブラーと呼ばれる容器内で、キャリアガスである高純度水素を吹き込まれることで気化され、反応領域付近に運ばれる。そうして運ばれた原料の気体は、熱分解によって反応性の高い物質に変化し、基板表面に吸着して結晶化する。

成膜方法の選択

ターゲットとなる物質に関して、真空蒸着とスパッタリングは金などの金属やアルミナなどの酸化物など幅広い物質の堆積が可能であるのに対して、CVD 法は原料となるガスが準備できるかどうかという点で限られた物質のみ堆積可能となる。真空蒸着とスパッタリングの使い分けは、指向性を利用するかや、成膜時間などを考慮して、適切な方法を選択する。

4.1.2 エッチング技術

エッチングとは、半導体素子作製においてチップの表面を全面もしくはマスクを利用して一部を削る工程を指す。本研究においては、導波路の形成、コンタクト層の除去などに利用した。エッチングはその物質除去の原理において、溶液中の化学反応を利用したウェットエッチングと、反応性ガスやプラズマを用いたドライエッチングの 2 つに分類される。エッチングを評価する指標として、エッチングの進行速度を示すエッチングレート、マスクとエッチングしたい物質のエッチングレートの比である選択比、エッチング形状などが存在する。ウェットとドライ、いずれのエッチング方法にも長所と短所が存在するため、利用用途によって適切な方法を選択する必要がある。

例えばエッチング形状に関して、同じマスクパターンで導波路のエッチングを行った場

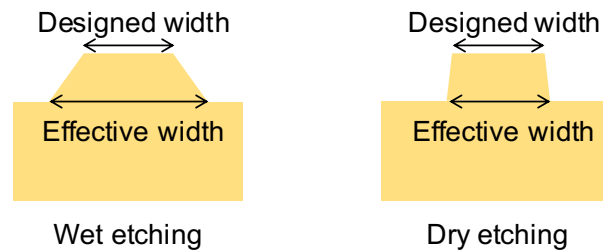


Fig. 4.2 Difference in etching shape between dry etching and wet etching

合の断面図の比較を Fig. 4.2 に示す。ドライエッチングを用いた導波路は、実効的な導波路幅がマスクで設計した値と大差なく垂直にエッチングが進行する。一方、ウェットエッチングの場合、エッチングが進行するほど実効的な導波路幅に広がりが生じ、設計値と大きな差が出てしまう。よって微細加工においては、ドライエッチングのほうが有利であるとされている。

次からは本研究で使用したものを中心に、ウェットエッチング、ドライエッチングの詳細を述べる。

ウェットエッチング

ウェットエッチングでは、加工を行うチップをエッチング溶液（エッチャント）に浸し、化学的な反応を利用することで目標となる物質の除去を行う。化学的な反応を利用しているため、レジストなどのマスクとなる物質を適切に選択することで、ほぼ無限大の選択比を得ることが可能である。

エッチングはその進み方によって、等方性エッチングと異方性エッチングに分類される。等方性エッチングはどの方向にも同じ速度でエッチングが進行するのに対して、異方性エッチングは一方向のみに進行する場合を指す。ウェットエッチングでは、反応を起こす溶液中の物質は等方的に動いているため異方性エッチングとなる。そのため、マスクの下部もエッチングされてしまうアンダーカットと呼ばれる現象が起きる。さらに、InP や GaAs などの非対称結晶のエッチングにおいては、結晶面の方向によってエッチングの速度が異なる面方位依存性が大きいいため、基板を利用する向きによってエッチング形状に大きな差が生まれる。本研究で使用した GaAs の場合、Ga が多く含まれる面と As が多く含まれる面があり、面方位によってエッチング形状が異なる [40]。Fig. 4.3 に GaAs のパターンニング方向によるエッチング形状の違いを示す。(1 1 0) に沿った導波路のエッチングは逆メサの形状に、 $(\bar{1} 1 0)$ 面に沿った導波路は順メサの形状にエッチングされる [41]。

ウェットエッチングによって InGaP と GaAs をエッチングし導波路形成を行う場合、これらのエッチャントとしては酢酸と塩酸と過酸化水素を混合させたもの [42] や、リン酸と塩酸と過酸化水素を混合させたもの [43] などの報告がある。これらのエッチャントにおい

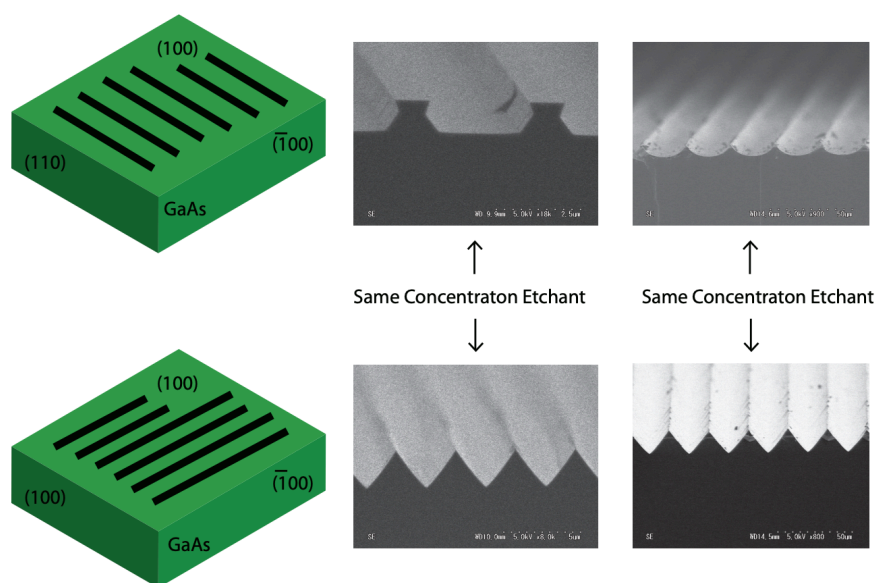


Fig. 4.3 Difference in etching shape by patterning direction [41]

Table 4.1 Etched materials, etchants and temperature used in this study

Etched material	Etchant	Temperature
GaAs	NH_3 , H_2O_2	RT
Cr	HNO_3 , $\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6$	RT
SiO_2	Buffered $\text{HF}(\text{NH}_4\text{HF}_2, \text{NH}_4\text{F})$	RT

て、過酸化水素を抜くと GaAs 層の上の InGaP 層をエッチングする場合に十分な選択性が得られると報告されている。

本研究においては上述したように導波路の形成にウェットエッチングは使用していないが、位相変調器部分以外の GaAs コンタクト層の除去にウェットエッチングを使用している。この場合、InGaP 層の上の GaAs 層を選択的にエッチングする必要があり、エッチング形状は問題にならないが、InGaP に対する GaAs の選択比の高さが重要となる。本研究では、研究室内で成功例のあるアンモニアと過酸化水素の混合エッチャントを使用した [44]。その他、本研究で用いたエッチング対象の材料、エッチャントと温度を Table 4.1 に示す。

ドライエッチング

多くの場合プラズマを利用し、気体と半導体を化学的に反応させるラジカルエッチングと加速したイオンをぶつけることによって削るイオンエッチングという手法を組み合わせで用いる。

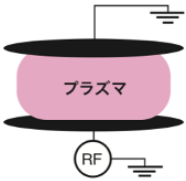
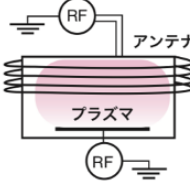
項 目	CCP	ICP
構 成		
放電圧力(Pa)	10~100	0.05~1
プラズマ密度(cm^{-3})	$\sim 10^{10}$	$\sim 10^{12}$

Fig. 4.4 Configurations of CCP and ICP [45]

プラズマを用いたプロセスにおいて、高周波（RF）電圧を印加する方法が用いられる。高周波（RF）電圧は、電子は応答可能で陽イオンは応答不能となる周波数を用いる。高周波（RF）放電で利用される構造に、融合結合プラズマ（ICP, inductively coupled plasma）と、容量結合型プラズマ（CCP, capacitively coupled plasma）がある。Fig. 4.4 に CCP と ICP の構成を示す。CCP は電極間に RF 電界を発生させることでプラズマを生成する。この場合、イオンフラックスとイオンエネルギーを独立に制御できないという問題がある。ICP はチャンバー外にコイルが巻かれた構造で、コイルにも RF 電圧が印加される。放電パワーによってイオンフラックスを、バイアスパワーによってイオンエネルギーを、独立に制御できる。また、ICP は CCP よりも高濃度なプラズマを発生させることができる。ICP をドライエッチングに用いる場合、制御やプラズマ濃度の利点によって、エッチング形状や選択性を制御しやすいという長所がある。

4.2 素子の作製プロセス

4.2.1 プロセスフロー

光フェーズドアレイ素子の大規模化のためには、導波路エッチング形状の垂直性が重要となる。ウェットエッチングでは導波路形状は垂直性の低い台形状となり実効的な導波路幅が太くなるため、ドライエッチングを用いる必要がある。

本研究室では、これまで InP 系の材料で光フェーズドアレイの作製を行ってきたが、GaAs や InGaP での作製技術は未確立であった。ゆえに、これらの材料でのデバイス作製技術の確立を急務とし、取り組んできた。

Fig. 4.5 に図示する基板層構造を、有機金属気相成長法（MOVPE）でエピタキシャル成長した。なお、この層構造は前章で設計したものより下側クラッド厚が薄くなっており、後にこれが原因で伝搬損失が大きくなってしまったことが判明する。InGaP 成長の条件出

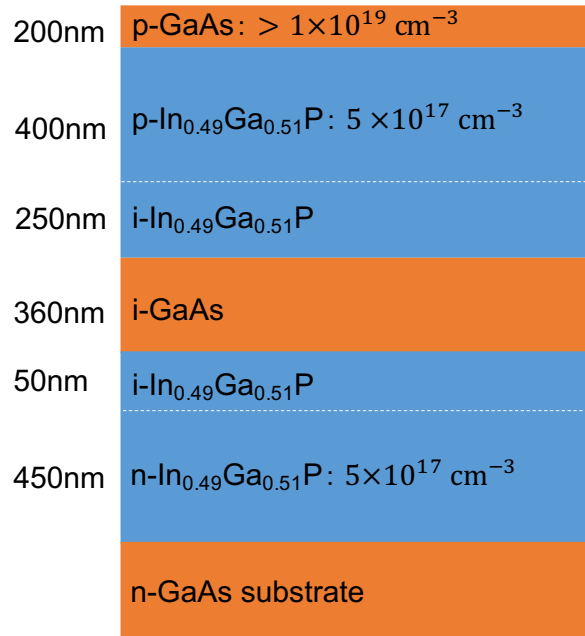


Fig. 4.5 Layer structure of epitaxial wafer used for fabrication.

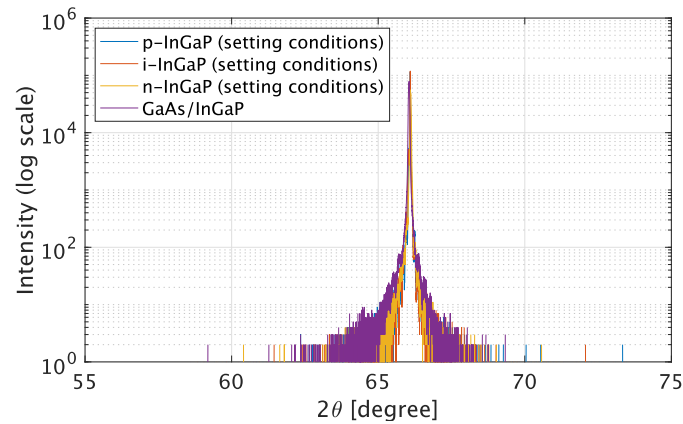


Fig. 4.6 XRD data.

しで成長された基板と設計した基板の XRD (X-ray Diffraction) 測定の結果を Fig. 4.6 に示す。ピークが 1 つのみ観測されたことから、成長した InGaP は GaAs に格子整合していることが示された。

今回のデバイス作製プロセスを Fig. 4.7 に示す。各図左側がパッシブ導波路、中央が位相変調部分、右側が電極パッドとして図示した。

大まかな流れは次のとおりである。

(1)~(9) 導波路形成

(10)~(12) コンタクトオープン

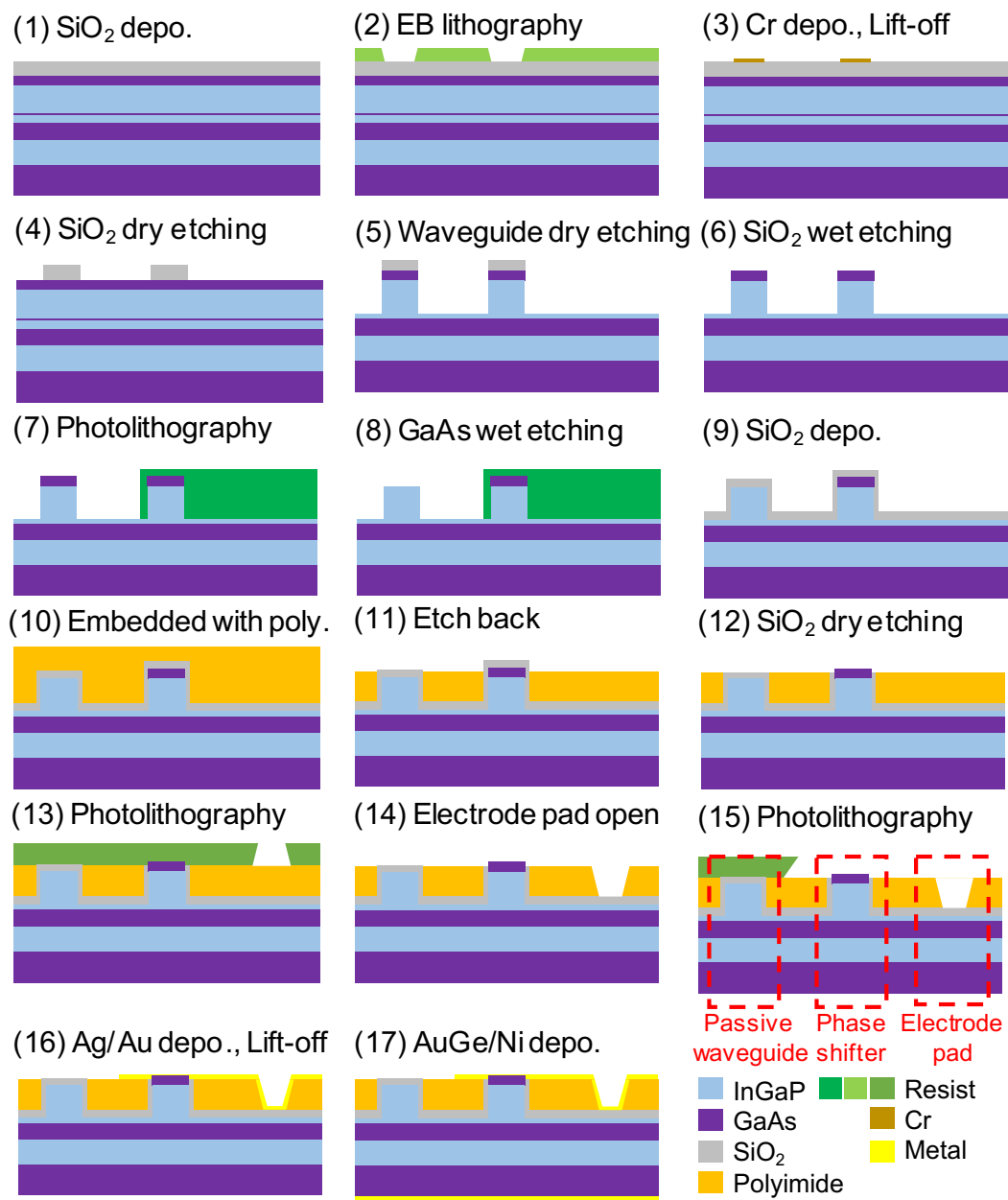


Fig. 4.7 Fabrication flow

(13)(14) 電極パッド形成

(15)～(17) 電極形成

ここから各工程の詳細を示す。

導波路形成

成長した基板に (1)~(4) で SiO_2 と Cr でハードマスクを作製する。ハードマスクを用いることで、レジストをマスクとした場合と比較するとより垂直性の高い導波路形状を実現できる。

- (1) PECVD を用いて、 350°C で 7 分間 SiO_2 の成膜を行う。膜厚はおよそ 420 nm である。
- (2) EB リソグラフィで導波路のパターニングを行う。まず、プライマーの OAP（ヘキサメチルジシラザン）をスピンコートし、 180°C で 1 分間ベークする。ここで必ずスピンコーターを清掃し、空気の入替えを行う必要がある。レジストを OAP 雰囲気下でスピンコートすると、レジストが表面に残留しうまく現像できなくなるためである。EB レジスト ZEP520A-7 を塗布し、 180°C で 3 分間プリベークする。ドーズ量 $35\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ で導波路パターンの EB リソグラフィを行い、現像液 ZED-N50 で 25 秒間現像する。
- (3) 電子線蒸着機で Cr を成膜する。 25 nm を目標値として、レート $0.05\text{ nm}/\text{sec}$ で成膜する。さらに、剥離液 ZDMAC に逆さに入れてリフトオフを行う。導波路部分に Cr が残留した状態になっている。
- (4) Cr をマスクにして、下層の SiO_2 を CHF_3/Ar で CCP-RIE ドライエッチングを行った [46]。レートは $27\text{ nm}/\text{min}$ 程度であるので、16 分間エッチングを行った。次に O_2/CHF_3 を用いた CCP-RIE で Cr を除去する。完全に除去するため、3 分間エッチングした。ここまでの工程では、Cr を用いずレジストをマスクとして SiO_2 のエッチングを行うことも可能である。それにも関わらず今回の方法をとったのは、マスクとしてレジストを用いた場合と比較すると SiO_2 を垂直にエッチングできるためである。素子の性能に大きく関わる導波路の垂直性を追求するためには、ここで SiO_2 を垂直にエッチングする必要がある。
- (5) GaAs と InGaP に対して、ICP-RIE で CH_4/H_2 と O_2 を用いたサイクルドライエッチングを行った。1 サイクルのエッチング時間は 10 秒、 O_2 クリーニングは 22 秒とした。1 サイクルあたりのレートは、GaAs がおよそ 8 nm 、InGaP が 14 nm 、 SiO_2 が 3 nm である。その都度段差計や SEM で観察を行いながら、所望の深さまでエッチングを行った。エッチング途中の断面 SEM 画像を Fig. 4.8 に示す。
- (6) バッファードフッ酸 (BHF) に 45 秒間浸し、 SiO_2 のウェットエッチングを行った。BHF は NH_4HF_2 を 17%、 NH_4F を 18.9% 含んだ溶液である。段差計や顕微鏡でエッチングが完了しているかを確認した。
- (7) 位相シフト部分を保護するため、ウィンドウパターンでフォトリソグラフィを行った。レジストはポジレジストの TMSR8900 を使用し、露光時間は 4.0 秒、現像時間

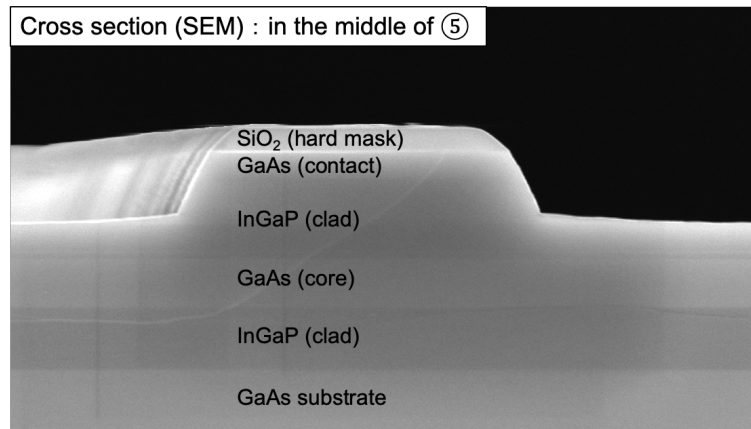


Fig. 4.8 Cross section(SEM image) of waveguide

は 45 秒とした。

- (8) ウェットエッチングでパッシブ部分の GaAs コンタクト層を除去する。エッチャントには、 NH_3 と H_2O_2 を 1 mL ずつ、純水 50 mL に混合したものを使用した。30 秒間でエッチングが完了した。
- (9) PECVD で 5 分間 SiO_2 を成膜し、導波路全体を SiO_2 の絶縁膜で覆った。

コンタクトオープン

- (10) 平坦化のため感光性ポリイミド「Photoneece PW-1200」をスピンコートによって塗布し、 120°C で 3 分間ベークした後、RTA (Rapid Thermal Annealing) を用いてキュアと呼ばれる熱硬化を施した。このとき RTA に設定した温度のレシピを Fig. 4.9 に示す。
- (11) エッチバックと呼ばれる工程で導波路の段差を利用して位相変調器部分の SiO_2 を露出させる。ポリイミドは感光性でネガティブフォトリソグرافとして使用可能であるため、フォトリソグラフィによって位相変調器部分のみ除去を行うという方法も考えられるが、現像を行っても位相変調器部分にポリイミドが残留するため、いずれにせよポリイミドのエッチングが必要となる [47]。数分ずつ時間を刻み、毎回顕微鏡で位相変調器部分の導波路を観察し、色むらがなく均一になるまでアッシングを続ける。Fig. 4.10 はこの工程途中での顕微鏡写真である。
- (12) CHF_3/Ar を用いたドライエッチングで露出した SiO_2 を除去し、GaAs コンタクト層を露出させる。

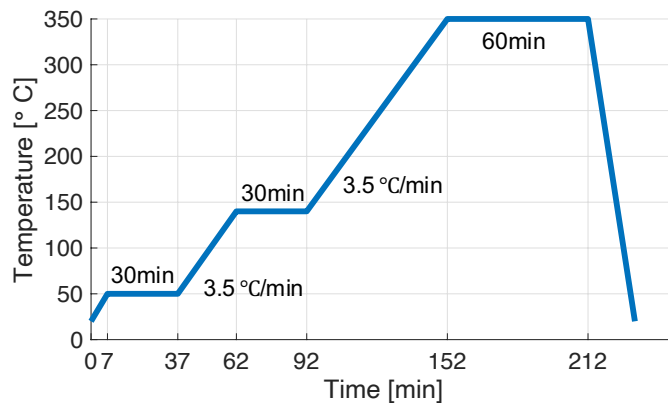


Fig. 4.9 Polyimide curing recipe set for RTA.

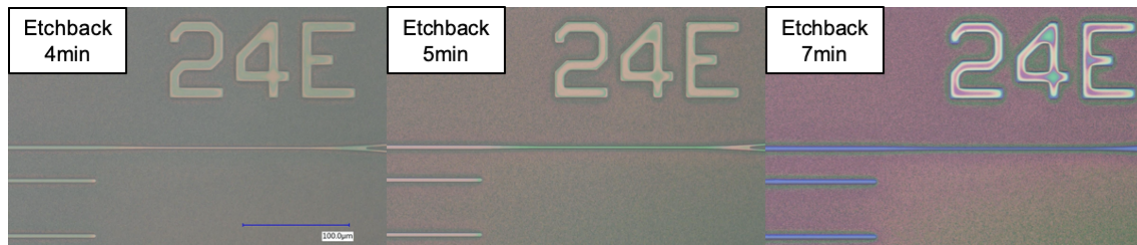


Fig. 4.10 Etchback process

電極パッド形成

- (13) 電極パッドパターンでフォトリソグラフィを行った。レジストはネガティブレジストとして使用できる AZ-5200NJ を使用した。パターン露光の時間は 2.2 秒間、反転ベークは 120 °C で 2 分間、全面露光は 10 秒、現像時間は 45 秒間とした。電極が途切れないようにするため、ネガレジストの形状を利用している。
- (14) O_2/CHF_3 によるドライエッチングによってレジストとポリイミドを掘り進め、電極パッド部分と位相シフト上面の SiO_2 を露出させた。時間を細かく刻んでエッチングを行い、その都度光学顕微鏡で電極パッド部分と位相シフト上面を観察し、色合いが均一になるまでエッチングを繰り返した。

電極形成

- (15) 電極パッドのフォトリソグラフィを行った。レジストは AZ-5200NJ を用い、条件は (13) と同様である。ここでも述べたネガレジストの形状を利用して、電極の蒸着後のリフトオフを容易にしている。
- (16) 表面電極を成膜する。電子線蒸着機で表面に Ag/Au を成膜し、リフトオフを行った。Ti は $0/\pm 30\text{ deg}$ で 15 nm ずつ、Au は $0/\pm 30\text{ deg}$ で 300/200 nm ずつ成膜

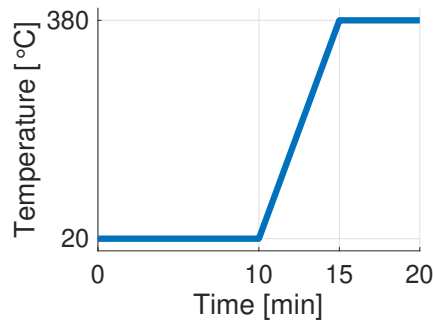


Fig. 4.11 Electrode annealing recipe set for RTA.

した。アセトンに浸した状態でスポイトで液を循環させ、レジストのある部分の Ag/Au が除去できるまでリフトオフを行った。

- (17) 裏面電極の成膜を行う。O₂/CHF₃ によるドライエッチングで裏面のレジストの残留物を除去し、電子線蒸着機で 0 deg から GeAu/Ni の裏面電極を成膜する。Ge を 28% 含んだ Au を 300 nm 成膜し、その上から Ni を 10 nm 成膜する。最後に RTA で電極のアニールを行う。その際の昇温のレシピを Fig. 4.11 に図示する。なお最初の 10 分間は N₂ ガスで十分に RTA 内の空気の置換を行うため、昇温を行わない。

リフトオフを行い、表面電極の形成が完了となる。次に電子線蒸着で 0 deg から GeAu/Ni の裏面電極を成膜する。Ge を 28% 含んだ Au を 300 nm 成膜し、その上から Ni を 10 nm 成膜する。最後に RTA で電極のアニールを行う。その際の昇温のレシピを Fig. 4.11 に図示する。なお最初の 10 分間は N₂ ガスで十分に RTA 内の空気の置換を行うため、昇温を行わない。

4.2.2 エッチング条件

InGaP のドライエッチングの条件テストを行っている際に、Fig. 4.12 に示すように基板表面に顕微鏡で観察可能なサイズの凹凸が生じていることが観測された。ドライエッチング前の基板を SEM で観察したところ、表面に異常は見られなかったため、InGaP のドライエッチングで生じたものと断定した。当初のサイクルドライエッチングの繰り返し部分の条件を Table. 4.2 に示す。なお、温度はすべて 60 °C に設定した。繰り返しエッチングプロセス後に 3 分間の O₂ クリーニングを挟んでから取り出し、表面状態を観測を行う。CH₄ と H₂ によるドライエッチングでは、基板表面にエッチングによる副生成物であるポリマーが発生することが知られている [46]。荒れた基板表面を SEM で観察したところ、その形状からそのポリマーが原因ではないかと考えた。エッチングレシピ後に O₂ クリーニングを行うことでポリマーの除去を行っていたが、それが不十分で表面に残留し、さらにエッチングの際にマスクとなって表面の荒れが進行したと推察される。

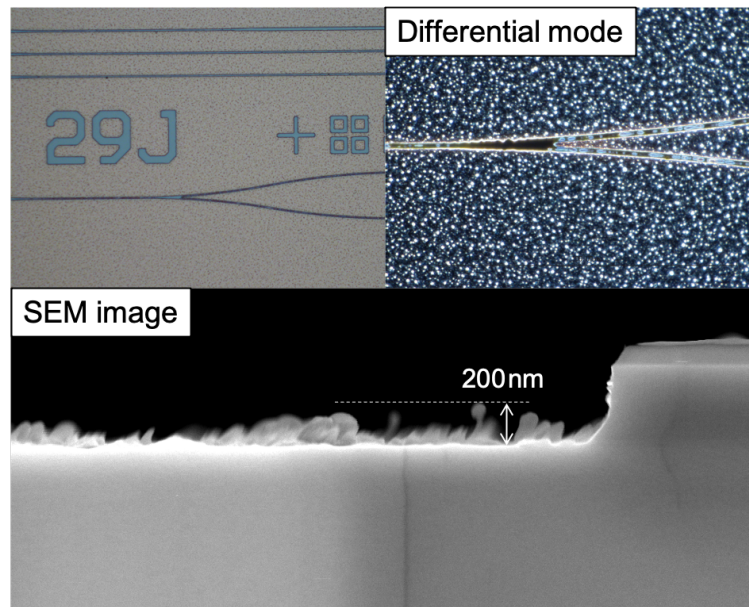


Fig. 4.12 Roughness at the surface of the chip after CH₄/H₂ cycled dry etching.

Table 4.2 InGaP cycled dry etching condition at the beginning.

Step name	Time	Power(RF/ICP)	Flow rate(O ₂ /CH ₄ /H ₂)	Pressure
Dry etching	60 sec	300 W/700 W	—/50 sccm/20 sccm	10 mTorr
Pump	10 sec	—	—	—
O ₂ cleaning	22 sec	40 W	50 sccm/—/—	75 mTorr
Pump	10 sec	—	—	—

この状態の改善のため、サイクルドライエッチングの条件を変更して表面の観察を行った。エッチングプロセス後の排気時間、O₂ クリーニングのレシピ、1 サイクルあたりのエッチング時間の変更を行った詳細を記す。

エッチングプロセス後の排気時間

仮にエッチングプロセス後の排気時間が十分でなく、O₂ クリーニング時にエッチングプロセスガスが残留している場合、エッチングによって生成された表面のポリマー除去が不十分となる可能性がある。そのため、エッチングプロセス後の排気時間のみ 10 sec から 20 sec に変更して試してみたが、顕微鏡や SEM で観察した結果には変化がなかった。

O₂ クリーニングレシピ

ポリマー除去のためにエッチング後に行う O₂ クリーニングの条件のうち、クリーニング時の印加電圧と 1 サイクルあたりのクリーニング時間の 2 点を変更した。

Table 4.3 Setting InGaP cycled dry etching condition.

Recipe	Etching time/cycle	Cleaning time/cycle
#1	30	22
#2	30	40
#3	30	90
#4	20	22
#5	20	40
#6	20	90
#7	15	40
#8	10	22
#9	10	40

・クリーニング時の印加電圧

40 W から 150 W に変更したが、変更前と同様に顕微鏡で表面の荒れが観測された。

・1 サイクルあたりのクリーニング時間

22 sec から 40 sec に変更したが、表面状態にあまり大きな差は認められなかった。

1 サイクルあたりのエッチング時間

クリーニング条件のみの変更で状態の改善が見られなかったため、表面の荒れはエッチング時の副生成物として基板表面に残留したポリマー自体ではないのではないかと考えた。つまり、表面の荒れの原因はポリマーがマスクとして作用し、エッチングが進行してしまったことに由来すると推測し、1 サイクルあたりのエッチング時間を短くすることを試した。今回は1 サイクルあたりのエッチング時間とクリーニング時間を変化させて、表面の観察を行った。設定した条件を Table 4.3 に示す。なお、それ以外の条件について、エッチングプロセス後の排気時間をすべて 20 sec に設定したほかは Table 4.2 の値と同じである。#1～#3 のエッチング時間を 30 sec/cycle としたものは、顕微鏡でもやはり表面の荒れが観測でき、Fig. 4.12 に近い状態となった。#4～#7 では顕微鏡で見る限りかなり改善はしていたものの、SEM で観測すると表面に粒状のものが残留していることが分かった。さらにエッチング時間を短くした#8、9 では、SEM でなめらかな表面が観測できた。#5 と #8 の場合のエッチング後の顕微鏡写真（差分モード）と導波路断面の SEM 画像を、Fig. 4.13 に示す。ハードマスクの SiO₂ の消耗を考えるとクリーニング時間は短いほうがよいので、実際の作製の際は#8 の条件を採用した。作製に用いた条件を Table 4.4 に示す。

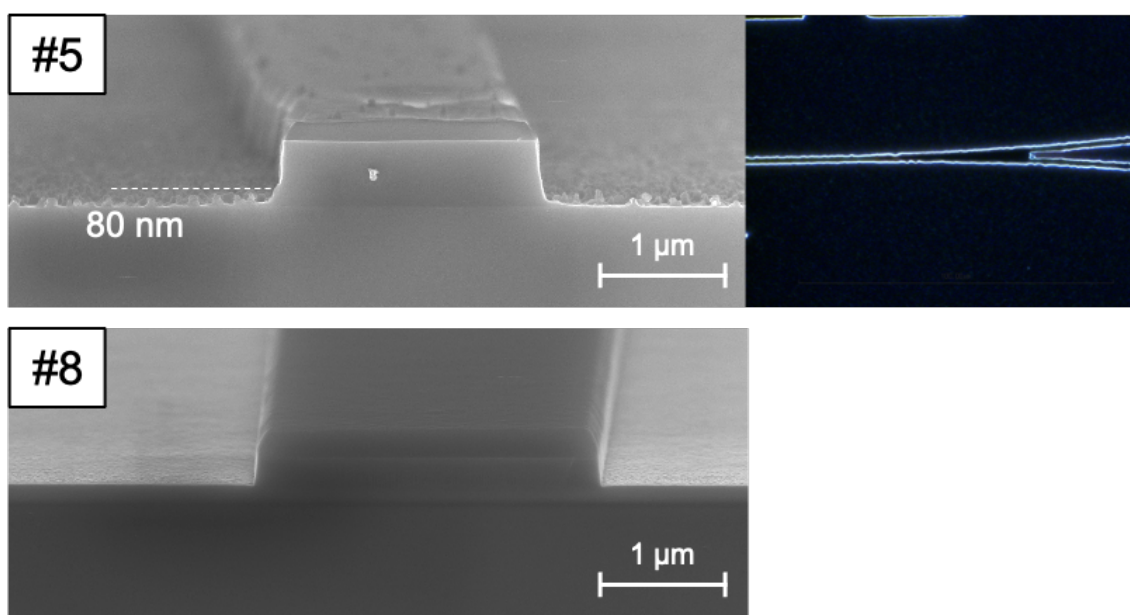


Fig. 4.13 Surface of the chip after CH_4/H_2 cycled dry etching.

Table 4.4 InGaP cycled dry etching condition used for the actual fabrication.

Step name	Time	Power(RF/ICP)	Flow rate($\text{O}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$)	Pressure
Dry etching	10 sec	300 W/700 W	—/50 sccm/20 sccm	10 mTorr
Pump	20 sec	—	—	—
O_2 cleaning	22 sec	40 W	50 sccm/—/—	75 mTorr
Pump	10 sec	—	—	—

4.3 位相変調器の特性評価用素子の作製結果

導波路作製技術の確立および位相変調特性の確認のため、前章で設計を行った導波路や位相変調器の特性評価のための素子を作製した。使用したマスクパターンは Fig. 3.15 である。Fig. 4.14 に作製の結果を示す。

研究室内で他に例がない事象に見舞われたため、ここで報告する。電極形成時のフォトリソグラフィに一度失敗し、有機洗浄でレジストを除去したところ、Fig. 4.15 のようにチップの縁のレジストが残留してしまった。ここで使用したフォトリソレジストの AZ-5200 はフッ酸系のガスや薬品に晒されると、レジストが固化し、有機洗浄しても残留してしまう [48]。今回の場合は直接レジストをフッ酸系のガスや薬品に晒してはいないものの、類似の状態になっている。仮説として、前の工程のエッチングガスの成分が表面に残留していてレジストに作用してしまった可能性もある。

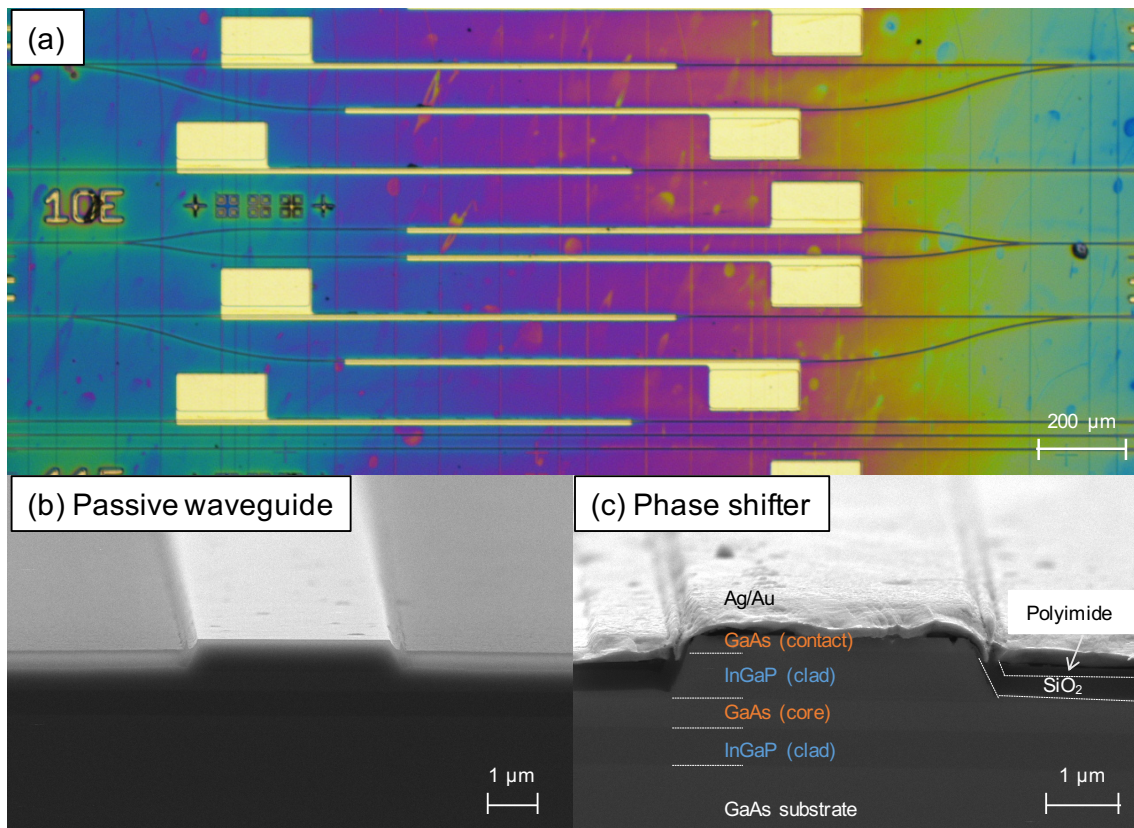


Fig. 4.14 Result of fabrication of devices for evaluating the characteristics of phase modulators. (a)Microscope image. (b)SEM image of the cross section of passive waveguide. (c)SEM image of the cross section of phase shifter.

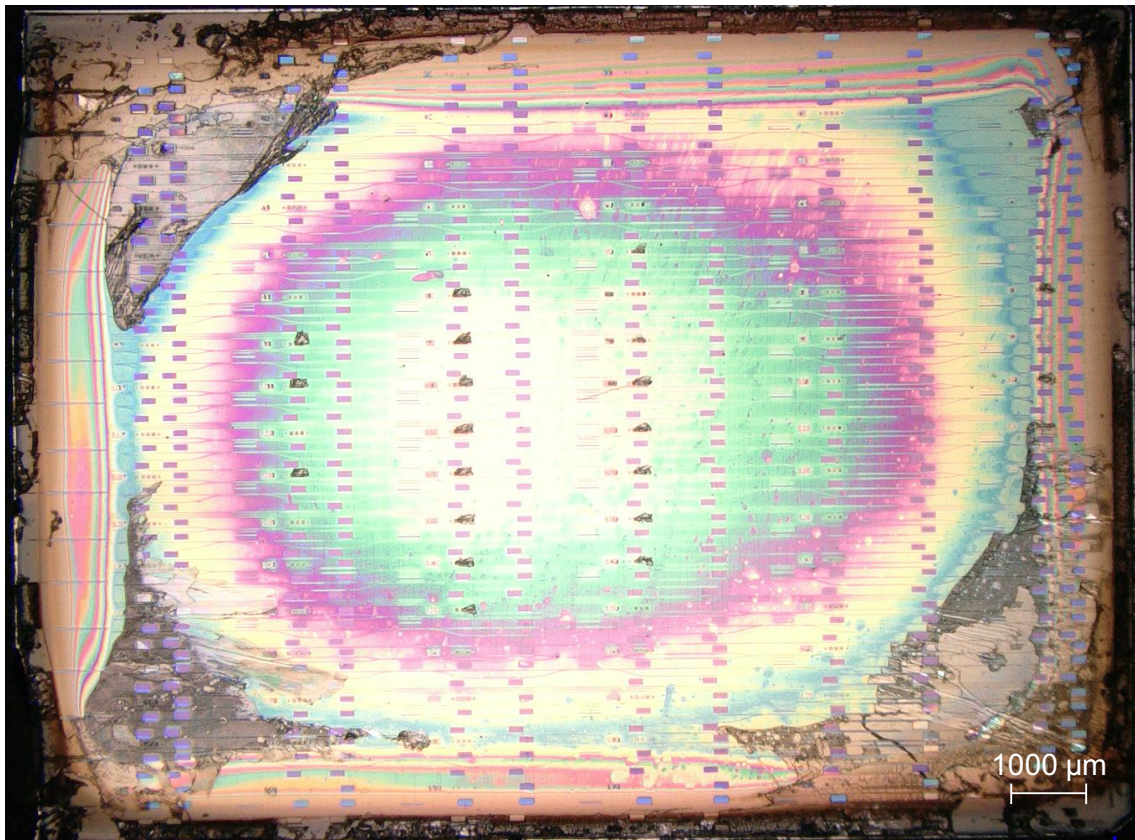


Fig. 4.15 Entire microscope image of fabricated chip before forming electrode.

第 5 章

測定

5.1 電流電圧特性の評価

電流電圧特性の測定結果を Fig. 5.1 に示す。素子ごとにばらつきは大きいが pin ダイオードの特性が得られている。①の領域では理想的なダイオード特性に近い結果が得られた。②の領域に入ると理想的な特性よりも電流値が小さくなるが、これは高水準注入効果の影響であると考えられる。理想的なダイオードでは、P 領域の多数キャリア濃度と比べて注入少数キャリア濃度は十分に小さいという仮定がなされているが、この領域では少数キャリア濃度が増加しておりこの仮定が成り立っていない。さらに印加電圧を大きくして③の領域になると、さらに電流値が小さくなる。この領域は抵抗性領域と呼ばれる領域で、電流値の増加によって抵抗成分での電圧降下が増大したことでダイオード部分にかかる電圧が小さくなった影響だと考えられる [23]。

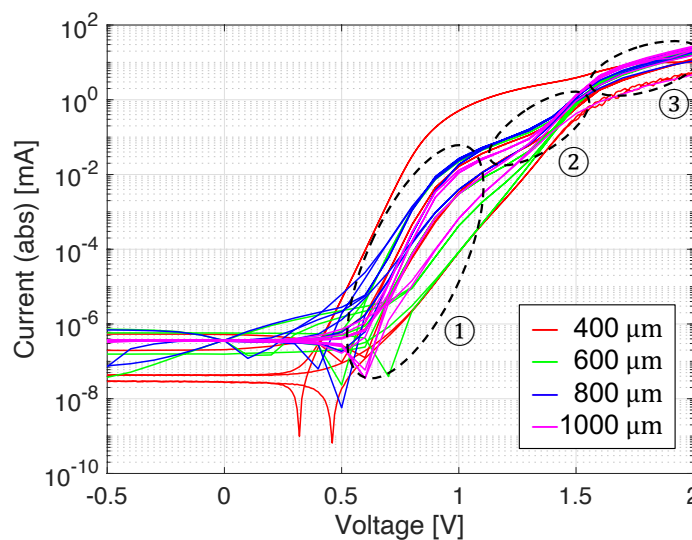


Fig. 5.1 Current-voltage characteristics of phase modulators.

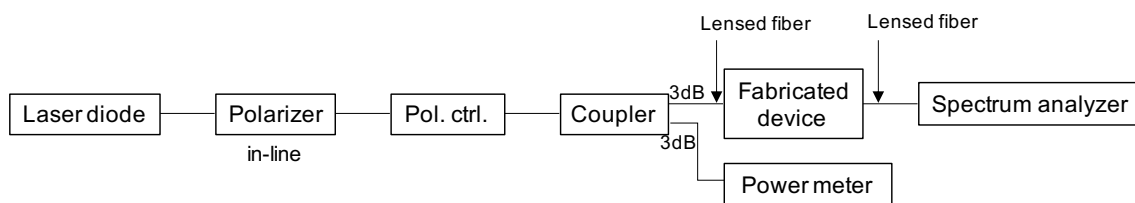


Fig. 5.2 Setup for measuring waveguide static characteristics.



Fig. 5.3 Picture during the measurement taken by the camera installed above the fabricated device.

5.2 光学特性の評価

5.2.1 導波路測定に用いた光学系

導波路測定に使用した光学系を Fig. 5.2 に、測定中のデバイス付近の写真を Fig. 5.3 に示す。デバイスに入力するレーザー光源には広帯域光源を使用した。作製したデバイスへの入力ファイバおよびデバイスからの出力を受けるファイバには、通常のシングルモード光ファイバよりも結合損を小さくできるレンズファイバを使用した。デバイスからの出力はレンズファイバを経由し、スペクトラムアナライザで観測される。

5.2.2 導波路特性

位相変調器長 $400\text{ }\mu\text{m}$ の部分の透過光スペクトルを Fig. 5.4 に示す。この透過率は素子の入力側のレンズファイバの手前の光強度と、出力側のレンズファイバの出力部の光強度の比を表す。直線導波路、非対称マッハツェンダー干渉計、対称マッハツェンダー干渉計のいずれに関しても光の導波を確認できた。しかし、最も損失が小さい直線導波路であっても透過率は -20 dB と損失が非常に大きい結果となった。この素子の光の伝搬方向の長さは 2.1 mm 程度であるので、結合損が $8\sim 12\text{ dB}$ 程度と見積もると、伝搬損失は $38\sim 57\text{ dB/cm}$ 程度となる。本来であれば、直線導波路でのファブリペロー共振や、非対称マッハツェンダー干渉計での透過スペクトル上のピークが観測できるはずであるが、今回の測

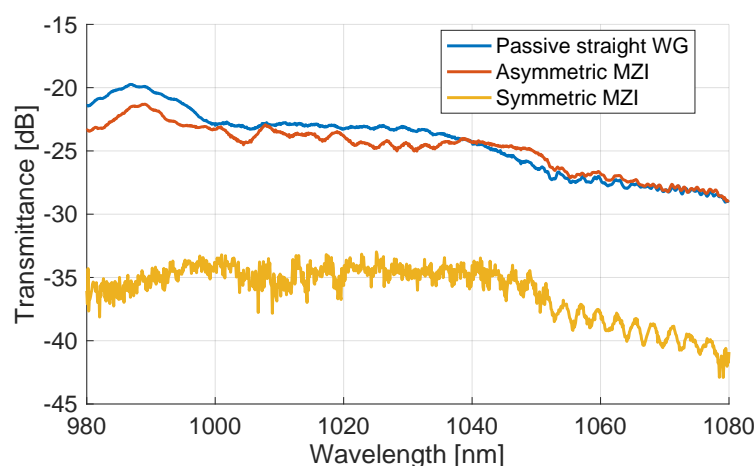


Fig. 5.4 Measured transmission spectra of the passive straight waveguide, asymmetric MZI and symmetric MZI.

定ではいずれも確認できなかった。

5.3 測定結果からの考察

直線導波路、対称マッハツェンダーと非対称マッハツェンダーの3つの透過スペクトルの結果を考察する。非対称マッハツェンダーのカプラは対称なY字形の分岐ではなく、一本は直線、もう一本は曲げ導波路という構成になっている。ここで、非対称マッハツェンダーは対称マッハツェンダーと比べると直線導波路のスペクトルにかなり近いということから、非対称マッハツェンダーの分岐した曲げ導波路のほうではそもそも分岐比が小さい上に、伝搬損失が大きく、ほぼ直線導波路のような振る舞いをしているのではないかと考えた。そう仮定すると、対称な曲げ導波路によって分岐している対称マッハツェンダーの透過光スペクトル強度が、他の2つに比べて10 dB程度小さいという結果とも合致する。曲げ部分でかなり大きな損失が発生しているはずである。

直線導波路であっても伝搬損失が大きい理由として1つ理由と断定できるのは、素子作製に使用した基板の下側クラッドの厚みが十分でなかったということである。下側クラッドが薄く、GaAs基板との距離が近すぎたため、基板への光の染み出しが多くなってしまい、伝搬損失が大きくなったと考えられる。下側クラッドの厚みを変化させた場合の伝搬損失を、有限差分固有モード法を用いて計算した結果をFig. 5.5に図示する。この基板の下側クラッドの厚みは500 nmであるが、その場合の伝搬損失は27 dB/cmであった。この計算結果より、下側クラッドの厚みは少なくとも900 nmは必要であったことが分かった。

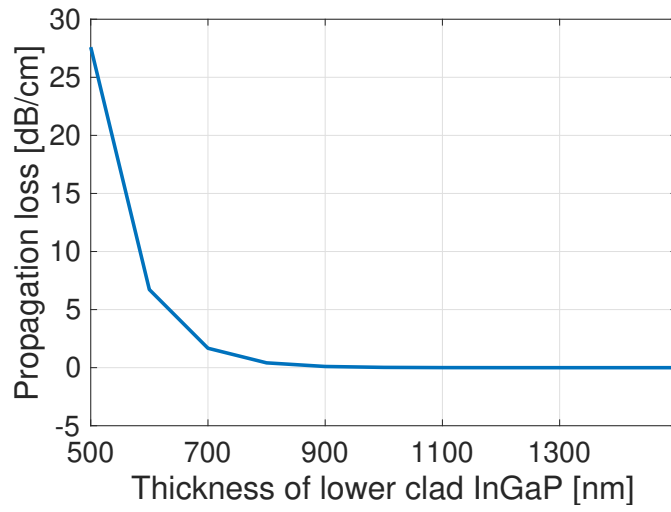


Fig. 5.5 Relation between the thickness of lower clad InGaP and the propagation loss.

第 6 章

結論

本研究では、バイオイメーシングや LiDAR の応用に向けて、1 μm 付近の波長を入力光とする光フェーズドアレイ素子の開発を行った。この波長帯での光フェーズドアレイ素子の先行研究では、酸化されやすい Al 化合物がクラッド層に使用されていたり、位相変調器の駆動原理が変調速度が比較的低速な熱光学効果であったりという課題が存在した。

それらの課題点を踏まえ、本研究ではコア層には GaAs を、クラッド層には GaAs に格子整合した $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ を用いる構成を提案した。この構成においては、大規模化を妨げる要因となる Al 化合物を使用していないため、産業化にむけて必須であるとも言える素子の大規模化を実現できる。さらにキャリア効果を用いた高速位相変調によって、高速ビーム掃引を実現できる。今回、1×25 光集積フェーズドアレイ素子について、基板構造、エッチング深さ、曲げ半径、スターカプラ長などの各種パラメータを数値解析により決定し、レイアウトの設計を行った。基板構造の設計において、スラブモード解析を利用してコア層の厚みを決定し、pin のダブルヘテロ接合を実現するべくドーピングプロファイルを設定した。導波路構造の決定において、エッチング深さ、導波路幅、曲げ半径の検討を行った。ここで高次モードの励起が起こりにくいことと曲げによる損失が小さいことはトレードオフの関係にあることを考慮し、数値計算の結果からパラメータの決定を行った。位相変調器に関しては、その長さと電流注入特性の関係をレート方程式から見積もり、導波路幅 2 μm 、位相変調器長 400 μm の場合において、9 mA で 2π の位相変調が得られることがわかった。さらに、1×25 光集積フェーズドアレイ素子のビームスプリッタであるスターカプラの長さを、ビーム伝搬法を用いた数値計算の結果 1000 μm と決定し、この場合の遠視野像を求めた。その結果、FSR は 1.91 deg、FWHM は 0.071 deg となり、理論通り 25 点以上の解像点数が得られることが分かった。大きさ 1.6 mm×5.0 mm で、消費電力は 400 mW 程度で理論通り 25 点以上の解像点数が得られる 1×25 GaAs/InGaP 光フェーズドアレイ素子を実現できることを数値計算で示した。

さらに、本研究室において未確立であった GaAs/InGaP での光導波路作製技術の確立のため、および位相変調器の特性を実験によって実証するために、直線導波路およびマッ

ハツェンダー干渉計で構成される特性評価用の素子の作製を行った。作製にあたって、InGaPのエッチング時に生じたポリマーが残留したことによる基板表面の荒れを解消するため、サイクルドライエッチングの条件の見直しを行った。この荒れは残留したポリマーをマスクとしてエッチングされたことに起因しており、1 サイクルあたりのエッチング時間を短くすることで表面の荒れは改善された。作製された電流電圧特性の結果は良好で、光学系を用いた導波路測定において光の導波を確認することができた。入出力部での結合損の合計が8~12 dB 程度と見積もると、伝搬損失は38~57 dB/cm 程度という結果になった。伝搬損失が大きく、ファブリペロー共振や非対称マッハツェンダーでの透過スペクトルのピークを確認することはできなかった。これは作製時に使用した基板の下側クラッドの厚さが薄かったことが主な原因と推察される。

これらの原因を取り除くことで、キャリア効果駆動の位相変調器の実証が期待される。さらに、今回確立した作製プロセスを使用することで、光集積フェーズドアレイ素子の作製は可能であるので、今後デバイスでのビーム掃引の実証も期待できる。

参考文献

- [1] Weihua Guo, Pietro R.A. Binetti, Chad Althouse, Milan L. Mašanović, Huub P.M.M. Ambrosius, Leif A. Johansson, and Larry A. Coldren. Two-dimensional optical beam steering with InP-based photonic integrated circuits. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 19, No. 4, 2013.
- [2] Martijn J.R. Heck. Highly integrated optical phased arrays: Photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering, jan 2017.
- [3] Ibrahim M. Soganci, Takuo Tanemura, and Yoshiaki Nakano. Integrated phased-array switches for large-scale photonic routing on chip. *Laser and Photonics Reviews*, Vol. 6, No. 4, pp. 549–563, 2012.
- [4] Jie Sun, Erman Timurdogan, Ami Yaacobi, Ehsan Shah Hosseini, and Michael R. Watts. Large-scale nanophotonic phased array. *Nature*, Vol. 493, No. 7431, pp. 195–199, 2013.
- [5] Kento Komatsu, Yasuyuki Ozeki, Yoshiaki Nakano, and Takuo Tanemura. Ghost imaging using integrated optical phased array. In *Optics InfoBase Conference Papers*, Vol. Part F40-O, pp. 6–8, 2017.
- [6] Yusuke Kohno, Kento Komatsu, Rui Tang, Yasuyuki Ozeki, Yoshiaki Nakano, and Takuo Tanemura. Ghost imaging using a large-scale silicon photonic phased array chip. *Optics Express*, Vol. 27, No. 3, p. 3817, 2019.
- [7] J. Wojtanowski, M. Zygmunt, M. Kaszczuk, Z. Mierczyk, and M. Muzal. Comparison of 905 nm and 1550 nm semiconductor laser rangefinders’ performance deterioration due to adverse environmental conditions. *Opto-electronics Review*, Vol. 22, No. 3, pp. 183–190, 2014.
- [8] Andrew M. Smith, Michael C. Mancini, and Shuming Nie. Bioimaging: Second window for in vivo imaging. *Nature Nanotechnology*, Vol. 4, No. 11, pp. 710–711, 2009.
- [9] Daniel Barolet, François Christiaens, and Michael R. Hamblin. Infrared and skin: Friend or foe. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Vol. 155, No. January 2016, pp. 78–85, 2016.

- [10] David Huang, Eric A. Swanson, Charles P. Lin, Joel S. Schuman, William G. Stinson, Warren Chang, Michael R. Hee, Thomas Flotte, Kenton Gregory, Carmen A. Puliafito, and James G. Fujimoto. Optical coherence tomography. *Science*, Vol. 254, No. 5035, pp. 1178–1181, 1991.
- [11] Adolf Friedrich Fercher. Optical coherence tomography – development, principles, applications. *Zeitschrift fur Medizinische Physik*, Vol. 20, No. 4, pp. 251–276, 2010.
- [12] A. Unterhuber, B. Považay, B. Hermann, H. Sattmann, A. Chavez-Pirson, and W. Drexler. In vivo retinal optical coherence tomography at 1040 nm-enhanced penetration into the choroid. *Optics Express*, Vol. 13, No. 9, p. 3252, 2005.
- [13] Michael S. Patterson, Brian C. Wilson, and Douglas R. Wyman. The propagation of optical radiation in tissue I. Models of radiation transport and their application. *Lasers in Medical Science*, Vol. 6, No. 2, pp. 155–168, 1991.
- [14] 板谷正紀. 眼底用光干渉断層計の進歩. *Medical Photonics*, No. 7, 2004.
- [15] QDLaser 社. プレスリリース : RETISSA(R) Display II.
- [16] Paolo Francesco Ambrico, Aldo Amodeo, Paolo Di Girolamo, and Nicola Spinelli. measurements in the mid-infrared region. Vol. 39, No. 36, 2000.
- [17] Mathias Prost, Yi Chun Ling, Semih Cakmakyapan, Yu Zhang, Kaiqi Zhang, Junjie Hu, Yichi Zhang, and S. J. Ben Yoo. MWIR Solid-State Optical Phased Array Beam Steering using Germanium-Silicon Photonic Platform. *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, OFC 2019 - Proceedings*, Vol. PP, p. 1, 2019.
- [18] D. R. Wight, J. M. Heaton, B. T. Hughes, J. C.H. Birbeck, K. P. Hilton, and D. J. Taylor. Novel phased array optical scanning device implemented using GaAs/AlGaAs technology. *Applied Physics Letters*, Vol. 59, No. 8, pp. 899–901, 1991.
- [19] Nicola A. Tyler, Daivid Fowler, Stephane Malhouitre, Stephanie Garcia, Philippe Grosse, Wilfried Rabaud, and Bertrand Szelag. SiN integrated optical phased arrays for two-dimensional beam steering at a single near-infrared wavelength. *Optics Express*, Vol. 27, No. 4, p. 5851, 2019.
- [20] Peter W. Epperlein. *Semiconductor Laser Engineering, Reliability and Diagnostics: A Practical Approach to High Power and Single Mode Devices*. John Wiley & Sons, UK, 2013.
- [21] Min Chul Shin, Aseema Mohanty, Kyle Watson, Gaurang R. Bhatt, Christopher T. Phare, Steven A. Miller, Moshe Zadka, Brian S. Lee, Xingchen Ji, Ipshita Datta, and Michal Lipson. Chip-scale blue light phased array. *Optics Letters*, Vol. 45,

No. 7, p. 1934, 2020.

- [22] Benedikt Schwarz, Peter Reininger, Daniela Ristanic, Hermann Detz, Aaron Maxwell Andrews, Werner Schrenk, and Gottfried Strasser. Monolithically integrated mid-infrared lab-on-a-chip using plasmonics and quantum cascade structures. *Nature Communications*, Vol. 5, No. May, pp. 1–7, 2014.
- [23] 土屋治彦, 三上修, 池上徹彦. 半導体フォトニクス工学. コロナ社, 1995.
- [24] Sungwon Chung, Hooman Abediasl, and Hossein Hashemi. A Monolithically Integrated Large-Scale Optical Phased Array in Silicon-on-Insulator CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 53, No. 1, pp. 275–296, 2018.
- [25] Y. P. Varshni. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. *Physica*, Vol. 34, No. 1, pp. 149–154, 1967.
- [26] Brian R. Bennett, Richard A. Soref, and Jesus A. Del Alamo. Carrier-Induced Change in Refractive Index of InP, GaAs, and InGaAsP. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 26, No. 1, pp. 113–122, 1990.
- [27] Mathias Schubert, V. Gottschalch, Craig M. Herzinger, Huade Yao, Paul G. Snyder, and John A. Woollam. Optical constants of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ lattice matched to GaAs. *Journal of Applied Physics*, Vol. 77, No. 7, pp. 3416–3419, apr 1995.
- [28] A. G. Foyt. The electro-optic applications of InP. *Journal of Crystal Growth*, Vol. 54, No. 1, pp. 1–8, 1981.
- [29] 小松憲人. 高速イメージング応用に向けた InP 光集積フェーズドアレイに関する研究. 修士論文, 東京大学, 2017.
- [30] G. B. Lush. B-coefficient in n-type GaAs. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 93, No. 8, pp. 1225–1229, 2009.
- [31] 柴田直. 半導体デバイス入門：その原理と動作のしくみ. 新・電子システム工学, No. TKR-6. 数理工学社, サイエンス社 (発売), 2014.
- [32] 生駒俊明, 東田隆河, 長谷川文夫. ガリウムヒ素. 電子材料シリーズ. 丸善, 1988.
- [33] G. Sai Saravanan, K. Mahadeva Bhat, S. Dhamodaran, A. P. Pathak, R. Muralidharan, H. P. Vyas, D. V. Sridhara Rao, R. Balamuralikrishnan, and K. Muraleedharan. Evolution of surface morphology of alloyed AuGe/Ni/Au ohmic contacts to GaAs microwave FETs. *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 30, pp. 62–74, 2015.
- [34] Warakorn Yanwachirakul. *Fabrication and characterization of 1.2-eV InGaAs/GaAsN multiple quantum well with flattened conduction band structure for multi-junction solar cell applications*. Doctoral thesis, The University of Tokyo, 2017.
- [35] Masaki Ogawa. Alloying behavior of Ni/Au-Ge films on GaAs. *Journal of Applied Physics*, Vol. 51, No. 1, pp. 406–412, 1980.

- [36] C. J. Oton, C. Manganelli, F. Bontempi, M. Fournier, D. Fowler, and C. Kopp. Silicon photonic waveguide metrology using Mach-Zehnder interferometers. *Optics Express*, Vol. 24, No. 6, p. 6265, 2016.
- [37] 麻蒔立男. 薄膜作成の基礎. 日刊工業新聞社, 1997.
- [38] R. A. Levy. *Microelectronic Materials and Processes*. Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [39] 出浦桃子. 次世代高機能集積回路に向けた有機金属気相成長による Si 上 InGaAs の横方向成長手法の開発と成長機構の解析. 博士論文, 東京大学, 2011.
- [40] Sadao Adachi and Kunishige Oe. Chemical Etching Characteristics of (001) GaAs. *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 130, No. 12, pp. 2427–2435, 1983.
- [41] 金ボラム. 光閉じ込め効果を用いた高効率量子井戸太陽電池の作製. 修士論文, 東京大学, 2013.
- [42] J. R. Flemish and K. A. Jones. Selective Wet Etching of GaInP , GaAs , and InP in Solutions of HCl , CH₃COOH , and H₂O₂. *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 140, No. 3, pp. 844–847, 1993.
- [43] Jaroslava Skriniarova, Jaroslav Kovac, Juraj Breza, and Dagmar Gregusova. Wet Etching of InGaP and GaAs in HCl: H₃PO₄: H₂O₂. *Sensors and Materials*, Vol. 10, No. 4, pp. 213–218, 1998.
- [44] 長岡恵里奈. 高効率と低コストの両立に向けた GaAs/Si ウェハボンディング 2 接合太陽電池の設計と試作. 修士論文, 東京大学, 2017.
- [45] 住友化学. GaN 単結晶基板の開発, 2018.
- [46] V. J. Law. Alkane based plasma etching of GaAs. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* & *Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, Vol. 9, No. 3, p. 1449, 1991.
- [47] Ibrahim Murat Soganci. *Integrated Phased-Array Photonic Switches for Ultra-Large-Capacity Optical Packet Routing*. Doctoral thesis, The University of Tokyo, 2010.
- [48] 土屋里穂子. 2 次元高速ビーム走査に向けた光集積フェーズドアレイ素子の設計と試作. 卒業論文, 東京大学, 2019.

発表文献

学会発表

1. ○土屋里穂子, 福井太一郎, 田之村亮汰, 種村拓夫, 中野義昭, “三次元導波路を結合した光集積フェーズドアレイ型ビーム走査素子の設計と試作,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 伊香保, Apr. 2019. (ポスター発表)
2. ○Rihoko Tsuchiya, Taichiro Fukui, Ryota Tanomura, Takuo Tanemura, and Yoshiaki Nakano, “Design and Fabrication of Optical Phased-Array Beam-Steering Device Coupled with 3D Waveguide,” *Tsinghua University - The University of Tokyo Joint Symposium 2019*, Materials and Devices Workshop, Beijing, May 2019. (ポスター発表)
3. ○Rihoko Tsuchiya, Warakorn Yanwachirakul, Eisaku Kato, Taichiro Fukui, Ryota Tanomura, Takuo Tanemura, and Yoshiaki Nakano, “Design of GaAs / InGaP Integrated Optical Phased Array for Imaging at 1 μm Wavelength,” *Photonic Device Workshop 2020*, P-(12), Online, Nov. 2020. (ポスター発表)

受賞

- **Best Student Poster Award**, *Photonic Device Workshop 2020*.

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご協力をいただきました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

指導教員である中野義昭教授には研究のための実験設備、環境を整えていただきました。この中野教授のご尽力により、充実した環境で研究に集中することが出来ました。加えて、ミーティングの発表練習の場などでは温かいご指導をいただき、安心して本番に臨むことが出来ました。そのほかでも、中野先生の明敏かつ温かいお人柄に助けられた場面が多かったです。ありがとうございました。

種村拓夫准教授には、研究テーマの決定の段階からこれまで、計算方法や素子の作製、測定の方法などあらゆることに関して非常に親切にご指導いただきました。また、研究室ミーティングでの発表練習のあとに毎回きめ細かいアドバイスをいただいたり、外部発表での提出資料を添削していただいたり、非常にご多忙な中の貴重なお時間を割いていただき、心から感謝申し上げます、

加藤豪作学術支援職員には研究室の実験設備の整備をしていただき、万全の状態安心して実験に取り組むことが出来ました。修士に入って私が半導体プロセスを開始してから、ICP エッチャー、冷却水、EB ライター、スピンドーターなどのありとあらゆる装置が運悪く故障し、心が折れそうになることもありました。そのたびに迅速に対応していただいたおかげで、なんとか素子を完成させることができました。本当に何度もお世話になり、ありがとうございました。

特任研究員の Warakorn Yanwachirakul 氏には結晶成長をしていただいたり、GaAs/InGaP のファブリケーションについてご教授いただいたりと、大変お世話になりました。新しい材料系でプロセスに取り組むにあたって、非常に心強い存在でした。感謝申し上げます。

博士課程 1 年の福井太一郎氏、田之村亮汰氏には学部 4 年の研究室配属直後から、数え切れないくらい多くのことをご指導いただきました。福井氏にはこの分野の基礎的な内容、計算の際の数学的な内容など幅広い知識を幾度となく教えていただきました。田之村氏にも理論的な内容から作製プロセスに関してまで、幅広い分野について幾度となく疑問点を質問させていただきました。ご多忙な中、私の無教養な質問にも親切にに応じていただき、感謝の言葉しかありません。また、お二人は研究室の他のメンバーを巻き込む力も強い

で、周囲のコミュニケーションを活発にしておられ、それが研究室全体の雰囲気によさにも繋がっているのではないかと思います。3年間ありがとうございました。

OBの小松憲人氏はその偉大な研究の功績に加えて、研究に使用するソフトウェアなどにおいても、3年間大変お世話になりました。残してくださった修士論文は、私にとってバイブルのような存在でした。厚く御礼申し上げます。

OBの菅沼貴博氏には、学部生時代に半導体プロセスをいろはからご教授いただきました。プロセスの手順だけでなく、装置の仕組みなどの原理も教えていただき、修士に入ってからその経験がとても役立ちました。

学部生の頃からの研究室同期である伊藤まいこ氏、梅崎敏和氏、宮崎俊輝氏は研究室生活を送る上で欠かせない存在でした。伊藤まいこ氏とは、女性が少ない環境下で同期として3年間同じ研究室で過ごせただけでも非常にありがたい存在ですが、それに加えて、何気ない楽しい雑談をしたり、研究に関わることであればその豊富な見識を惜しみなく与えてくれたり、私の大きな心の支えでした。梅崎敏和氏、宮崎俊輝氏とも3年間仲間として、何度も何度も助けられました。三名のおかげで、楽しい思い出が数多く思い浮かぶ研究室生活を過ごすことができました。厚くお礼申し上げます。

杉山研の同期である沈昊哉氏、日野眞生氏にも、研究室生活を送る上で何度もお世話になりました。

その他ここに名前を挙げていない方であっても、中野・杉山・種村研究室および両隣の三田研・小関研の方々の皆様には、幾度となく助けていただきました。

最後に、このような恵まれた環境の中で研究できるような機会を与え、精神的に支えてくれた両親、経済的に支えてくれた祖母を始めとする全ての方々に深く感謝し、謝辞に代えさせていただきます。

2021年1月28日

土屋 里穂子