

# 修士論文

シリコン高屈折率差格子を用いた  
垂直入射型高速光変調器

High-Speed Surface-Normal Optical Modulator using  
Silicon High-Contrast Grating

2020年1月28日提出

指導教員 種村 拓夫 准教授

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻

37-186445 小笠原 誠

## Abstract

垂直入射型の光変調器は2次元アレイ化が容易であり、多チャンネル並列光通信に用いることで、大容量通信の実現や光インターコネクト、光スイッチなどに応用が可能である。さらには、位相変調器をアレイ化することで波面変調を実現し、イメージングの分野にも応用が考えられる。このような垂直入射型の光変調器として注目を浴びているのはサブ波長程度の2次元構造を作りこんで、入射光に対して変調を加えることのできるメタサーフェスを利用したものである。金属を用いた構造によるプラズモニックメタサーフェスが主流であるが、我々の研究室では、シリコンによる高屈折率差格子(Si high contrast grating ; Si-HCG)に電気光学(Electro optic ; EO) ポリマーを埋め込んだ構造の誘電体のみからなるメタサーフェス光変調器を提案した。Si-HCGは超高Q値な共振器となり、EOポリマーのGHz以上の高速な応答速度と組み合わせることによって、高速かつ高変調度な変調を実現できると考えられる。先行研究においては、この構造の強度変調器が試作され、原理検証がなされた。ただし、共振器のQ値は約60程度であり、変調度は約5.3%にとどまっていた。また、変調速度に関しても最高で50 MHzの変調の確認にとどまっていた。

本研究では作製誤差耐性があり、高Q値なデバイス構造を数値シミュレーションにより求め、同時にSiグレーティングの垂直性に関する条件出しをすることで高Q値なSi-HCG構造の作製を行った。さらに、従来の測定系に比べて、より高速測定に適し、アライメント誤差にも強いような新たな光学測定系および新たなデバイス作製のマスクパターンを作製した。

その結果、実際に作製したデバイスについて先行研究の結果に対して共振Q値についてはおよそ19.4倍の1165、変調度についてはおよそ15.6倍の83.6%、変調帯域についてはおよそ10倍の500 MHzの強度変調を実証した。

今後の課題としては、500 MHzの変調速度を実証したがまだサブGHzであるため、よりデバイスサイズを微小化することやインピーダンスマッチングのとれたプローブを用いることでGHz以上の変調を実現することが挙げられる。また、今回の研究では1ピクセルのデバイスの性能の向上を実証したが、2次元アレイ化は行っていない。実用化を考えるとアレイ化は必須である。さらに、高速、高効率な位相変調器を実証することも今後実現すべき目標である。これらを実現することで、GHz以上の高速な強度および位相変調器が実現し、通信をはじめとした幅広い分野へと応用されることを期待している。

# 目次

1	背景.....	1
1.1	垂直入射型の光変調器.....	1
1.2	メタサーフェス.....	2
1.3	プラズモニックメタサーフェス.....	4
1.4	誘電体メタサーフェス.....	4
1.5	EO ポリマー.....	5
1.6	先行研究の結果.....	6
1.7	本研究の目標.....	8
2	EO ポリマーの原理.....	9
2.1	EO ポリマーの概要.....	9
2.2	ポッケルス効果とポーリング.....	10
2.3	EO ポリマーの性能.....	12
2.4	本研究に用いた EO ポリマー.....	14
3	HCG の原理.....	15
3.1	HCG の概要.....	15
3.2	計算に用いる HCG の構造.....	15
3.3	モード解析.....	16
3.4	共振条件.....	22
3.5	Dual-mode.....	24
4	シミュレーション.....	25
4.1	シミュレーション手法.....	25
4.2	グレーティング角度の影響.....	25
4.3	高 Q 値構造の決定.....	27
4.4	変調帯域を決定する要因.....	28
4.5	基板へのドーピング濃度の影響.....	29
4.6	ビーム幅とデバイスサイズの影響について.....	30
5	光学測定系.....	32
5.1	従来の測定系.....	32
5.2	新しい測定系.....	33
5.3	光源、受光装置等.....	35
5.4	新しい測定系の構成手法.....	35
5.5	新たなフォトマスクの設計.....	37
6	プロセス.....	39
6.1	プロセスフロー.....	39

6.2	Si のドライエッチングの条件出し	43
6.3	ポーリング	45
6.4	EO ポリマー及び SOQ の観察	46
7	高変調度デバイスの光学測定	48
7.1	デバイス設計値	48
7.2	デバイス写真	48
7.3	共振測定	49
7.4	ポーリング結果	51
7.5	バイアス変調測定	52
7.6	交流変調測定	53
8	高速変調デバイスの光学測定	55
8.1	デバイス設計値	55
8.2	デバイス写真	56
8.3	ポーリング結果	57
8.4	共振測定	57
8.5	バイアス変調測定	58
8.6	交流変調測定	60
8.7	$r_{33}$ に関連して	61
8.8	変調帯域測定	61
9	結論	63
	付録 A デバイスサイズの共振に与える影響	65
	付録 B ドーピング濃度が共振、変調に与える影響	67
	付録 C 直流と交流の変調度の違いに関する考察	69
	付録 D 位相変調器	71
	D.I 位相変調器の構造	71
	D.II シミュレーション	71
	D.III プロセス	72
	D.IV 測定系、測定方法	74
	D.V 測定	76
	D.VI 考察	78
	参考文献	79
	発表	84
	謝辞	85

# 1 背景

## 1.1 垂直入射型の光変調器

光変調器とは入射光を電気信号により変調することで、電気信号を光信号に変換するための素子であり、光通信技術、イメージング用途など様々な分野で用いられる重要な素子である。Fig. 1.1 に、デバイス上の導波路を伝搬する光を変調する導波路型の光変調器と、デバイスに対して垂直に入射する光を変調する垂直入射型の空間光変調器の比較を示す。導波路型に比した空間光変調器の利点として、2次元アレイ化が容易である点が挙げられる。2次元アレイ化が可能になることで、光通信分野においては多チャンネル並列光通信が可能になり、光通信の通信容量を増大することが可能である。さらに、データセンター内で必要な、従来の電気配線を光配線に置き換えることで高速化、低消費電力化、低損失化等を可能にする光インターコネクタへの応用も可能である[1-4]。一方、2次元アレイ化の利点はイメージング分野においても存在する。2次元アレイ状の各ピクセルの位相を制御することで任意の波面を形成できることになり、導波路型の光変調器に比べて、自由度の高い波面変調が可能である。これにより、LiDAR(Light detection and ranging)や生体イメージング、リモートセンシング等に应用可能である[5-7]。

導波路型の光変調器としては、高速変調(> 50 GHz)を実現している報告例も多い[8,9]。一方、空間光変調器としては、従来の研究において液晶[10]やMEMS(Micro electro mechanical system)ミラー [11,12]を用いたものが主流である。液晶は配向分極に基づく電気光学(Electro optic ; EO)効果 による屈折率変調を利用して光を変調している。EO 効果の性能を評価するための指標である、EO 係数は非常に大きいのだが、配向分極の応答速度は $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 程度であるため、変調速度は1 kHz ~ 1 MHz 程度にとどまる。MEMS ミラーは、基板上に微細なミラー構造を作製し、静電気力や磁気力などにより物理的にこのミラーを傾けることでレーザー光を偏向している。このMEMS ミラーを用いた空間光変調器でも10 kHz ~ 10 MHz 程度の変調速度にとどまっている。さらに、垂直入射型の光変調器として研究されているものとしては、Fig. 1.2(a,b)に示すような、Ge/SiGe によるMQW(Multiple Quantum Well)構造をミラー構造で上下から挟んだ構造の例がある[13,14]。参考文献13の例では、10 dB 以上の消光比で3.5 GHz 以上の高速変調を実証している。一方で、これらのMQW を用いる変調器は、印可電圧の大きさによるMQW 層の光の吸収率の変化を用いて入射光の強度を変調しているため、強度変調を起こさないオールパス型の位相変調器に应用することができない。また、Fig. 1.2(c)に示すような、GaAs ベースで、自由キャリア効果を用いた変調器の例も存在する[15]。1200 nm ~ 2400 nm の広範囲で変調を実証しているが、変調度は43%(= 2.4dB)、変調帯域も20 MHz 程度にとどまっている。

このように、高速、高変調度、さらに位相変調器に応用可能という観点ですべてを満たすデバイスの実証はいまだになされていないのが実状である。加えて、挿入損失や低消費電力なども垂直入射型の光変調器の性能を比較するうえで重要な指標となっている。

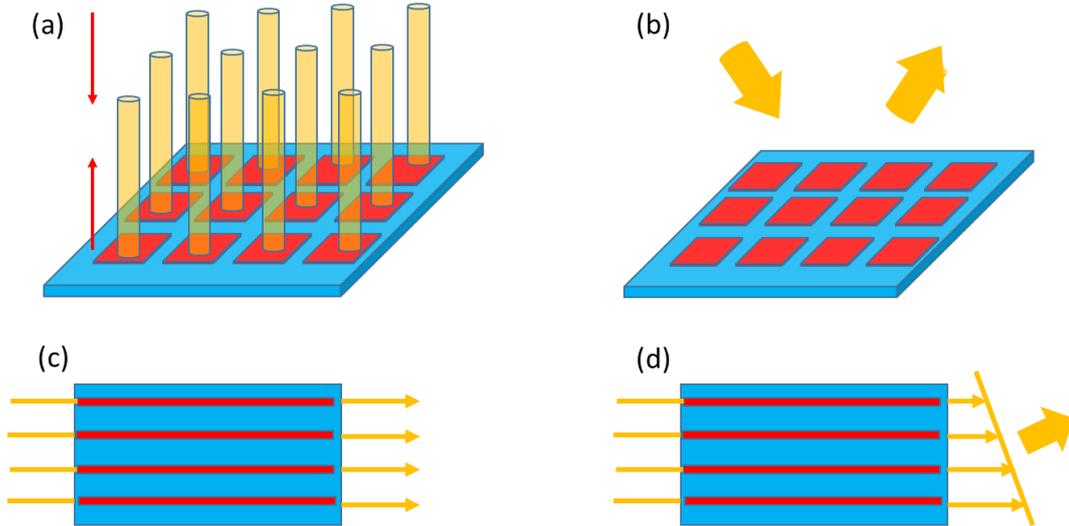


Fig. 1.1 Comparison between surface-normal optical modulators and waveguide optical modulators. (a) Multi channel parallel optical communication by surface-normal optical modulators, (b) Wavefront modulation by surface-normal optical modulators, (c) Multi channel parallel optical communication by waveguide optical modulators, (d) Wavefront modulation by waveguide optical modulators.

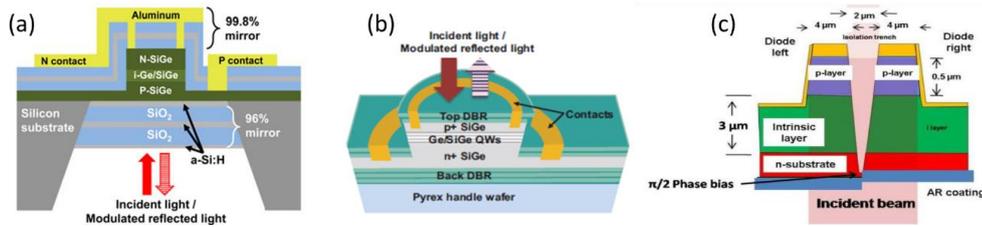


Fig. 1.2 Three examples of surface-normal optical modulators. (a) (b) Ge/SiGe-MQW modulators using top and bottom mirrors[13,14], (c) GaAs-based modulator using free carrier effect[15].

## 1.2 メタサーフェス

メタマテリアルとは、電磁波に対して自然界には存在しない振る舞いをする人工物質のことである。例えば、負の屈折率を持つメタマテリアルの場合、ある界面に入射した光が通常とは逆方向に屈折されることで、「くの字状に」折れ曲がる現象を生み出すことができる[16,17]。Fig. 1.3 に示す例では、金属ストリップと分割リング共振器と呼ばれるものを並べることで実現している。このようなメタマテリアルを2次元

上に作製したものを総じてメタサーフェスという。つまり、メタサーフェスとは、基板表面にサブ波長程度の微細な構造を作り込んで、入射光に対して、特異な透過特性、反射特性を得ることのできる素子のことである[18,19]。メタサーフェスの例としては、特定の周波数において入射電磁波の反射位相を0にすることのできる、人工磁気導体(Artificial magnetic conductor ; AMC)や高インピーダンス表面(High impedance surface ; HIS)、特定の波長の電磁波のみ吸収して、その他の波長では高反射率ミラーとなる吸収体、ホログラフィー、光変調器など様々なものがある[18-24]。Fig. 1.4は、グラフェンを用いたメタサーフェス光変調器のデバイス例である[24]。メタサーフェスの応用例はパッシブな動作のデバイスからアクティブな動作も可能なデバイスまで多岐にわたっている。



Fig. 1.3 The first example to achieve negative refractive index by using metal strip and split ring resonator[17].

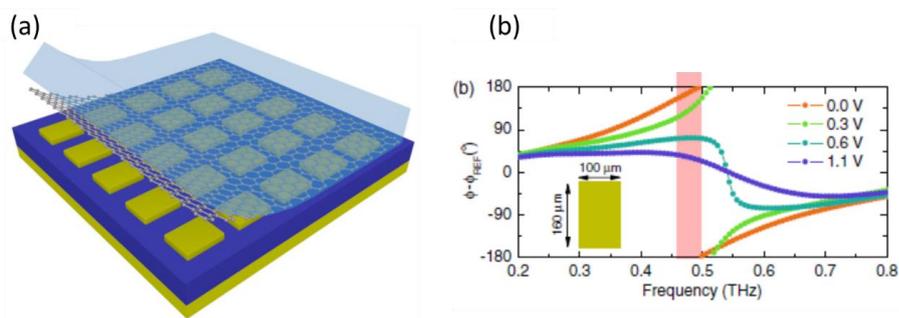


Fig. 1.4 An example of metasurface optical modulator[24]. (a)Device structure, (b)Phase modulation.

### 1.3 プラズモニックメタサーフェス

メタサーフェスを用いた光変調器は大きく2種類に分けられると考えられる。金属などを用いて、プラズモニクスの効果を用いた、プラズモニックメタサーフェスと、プラズモニクス効果を用いず、誘電体のみで構成される誘電体メタサーフェスである。プラズモニックメタサーフェス光変調器としては参考文献25のように、Fig. 1.5のようにSi上にSiO<sub>2</sub>薄膜を堆積してその上にAuグレーティング構造を作製することで、界面に表面プラズモンポラリトン(Surface plasmon polariton; SPP)を発生させることにより透過光を変調させるような構造のデバイスをはじめとして多種多様な例がある[25-30]。例えば、参考文献26の例では、1ピクセルのデバイスにおいて1GHzの変調速度で位相変調を実証していて、それを4×4ピクセルにまで拡張している。金属を用いることで、電極を含めたデバイスの抵抗を小さくすることができるため、高速な変調を実現することができる。ただし、変調できる帯域が中赤外領域に限られる例も多く、通信波長帯である1550nm波長帯での実現例は多くない。1550nm波長帯での実証例においても、挿入損失が大きくなるなどの問題点が存在する。通信への応用を考えると、このような点がプラズモニックメタサーフェスの課題であると考えられる。

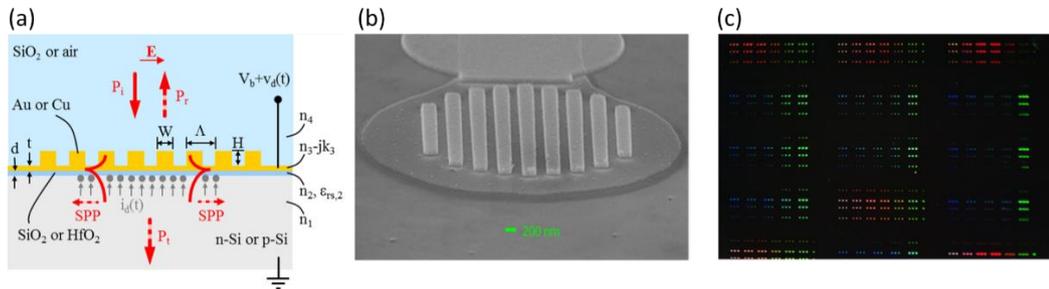


Fig. 1.5 An example of plasmonic metasurface optical modulator[25]. (a)Device structure, (b) Scanning Electron Microscope (SEM) image of the device, (c)Multi pixel phase modulation.

### 1.4 誘電体メタサーフェス

誘電体メタサーフェスは金属を用いないため、前節で紹介したプラズモニックメタサーフェスに比べて挿入損失が小さくなる利点があり、通信波長帯で利用することも可能である[7,31]。参考文献31のデバイスは、Fig. 1.6に示すように、Siによる高屈折率差グレーティング(High contrast grating; HCG)構造にグラフェンを埋め込むことで、グラフェンの電圧を印可することで光の吸収率を変化させることのできる性質と、Si-HCGの共振構造を組み合わせることにより、1585nmの波長において強度変調を実現している。金属に比べて、誘電体は大きな抵抗を持つため、変調帯域はプ

ラズモニックメタサーフェスに比べて小さくなる傾向がある。この例でも 10 MHz の強度変調にとどまっていた。しかし、これはグラフェンの応答速度がデバイスの変調速度を律速していたためであり、変調を担う媒質の応答速度によっては、より高速な変調も可能であると考えられる。

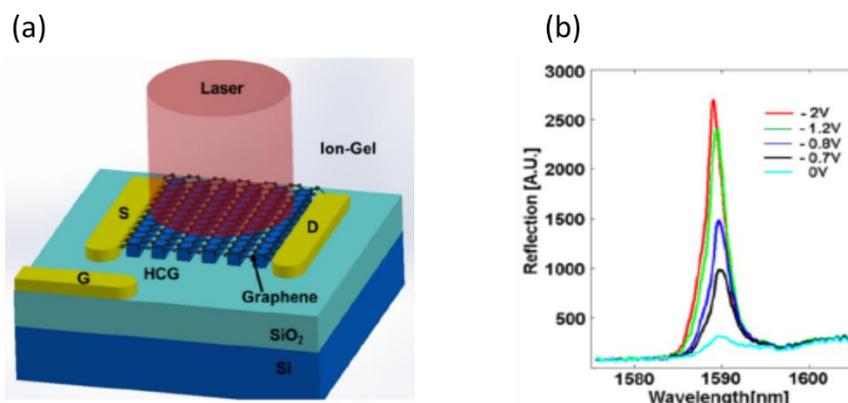


Fig. 1.6 An example of dielectric metasurface optical modulator[31]. (a)Device structure using graphene embedded in Si-HCG, (b)Demonstration of intensity modulation.

## 1.5 EO ポリマー

高速な変調を可能にする媒質として注目を集めているものが EO ポリマーである。これは電界を印可すると、電子分極に基づく EO 効果により屈折率変調が発生するポリマー状の物質のことである。詳しい構造や変調機構については、EO ポリマーの原理の節にて紹介する。EO ポリマーを用いた変調器として、100 GHz 以上の変調帯域を持つデバイスが実証されている[32,33]。変調の効率として、EO ポリマーの EO 係数  $r_{33}$  の発展の様子を表すグラフを Fig. 1.7 に示す[34]。EO ポリマーのように EO 効果を発現する材料のことを EO 材料と呼ぶが、通信分野などで現在広く使われている EO 材料はニオブ酸リチウム( $\text{LiNbO}_3$ ; LN)と呼ばれる有機材料である[35]。LN の EO 係数はおおよそ 30 pm/V である。また、LN の EO 効果はイオン分極に基づくため、光波とマイクロ波での屈折率分散が大きく、変調帯域は最大でも 40 GHz に限られる。しかし、EO ポリマーの研究初期段階では、EO ポリマーは大きな変調帯域を持つにもかかわらず、EO 係数は LN よりも小さく、LN を用いても、波長多重分割方式(Wavelength division multiplex; WDM)などを用いることで通信の大容量化は可能であったため、積極的に EO ポリマーの研究がなされることはなかった[35]。それでも、近年のインターネット動画配信の常態化やクラウドコンピューティングの普及により、通信容量のさらなる拡大が要求されるとともに、プロセッサ間の光インターコネクの実現のために、低電圧で高速動作が可能な光変調器が求められている中で、再び EO ポリマ

一の研究は活発になった。その結果、今現在では、LN に比べても非常に大きな EO 係数を持つ EO ポリマーが開発されている[36,37]。

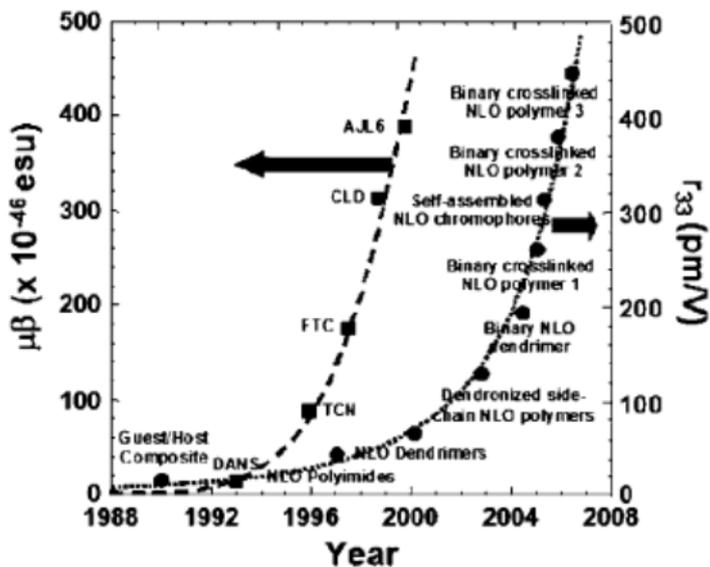


Fig. 1.7 Development of EO coefficient  $r_{33}$  of EO polymer[34].

## 1.6 先行研究の結果

このような垂直入射型の光変調器、メタサーフェス、EO ポリマーに関連する研究として、当研究室では先行研究において、Fig. 1.8 に示すような、EO ポリマーを Si による HCG に埋め込んだ構造の垂直入射型の光変調器が提案され、強度変調器において原理実証がなされた[38,39]。先述したような EO ポリマーの高速な応答速度を利用して、垂直入射型にて GHz 以上の帯域を持つ変調器を作製することが期待されている。また、この構造の利点としては、不純物イオンを注入した Si を楕歯型にエッチングすることにより、グレーティング構造に用いるだけでなく、EO ポリマーに電界をかけるための電極としても利用できる点がある。

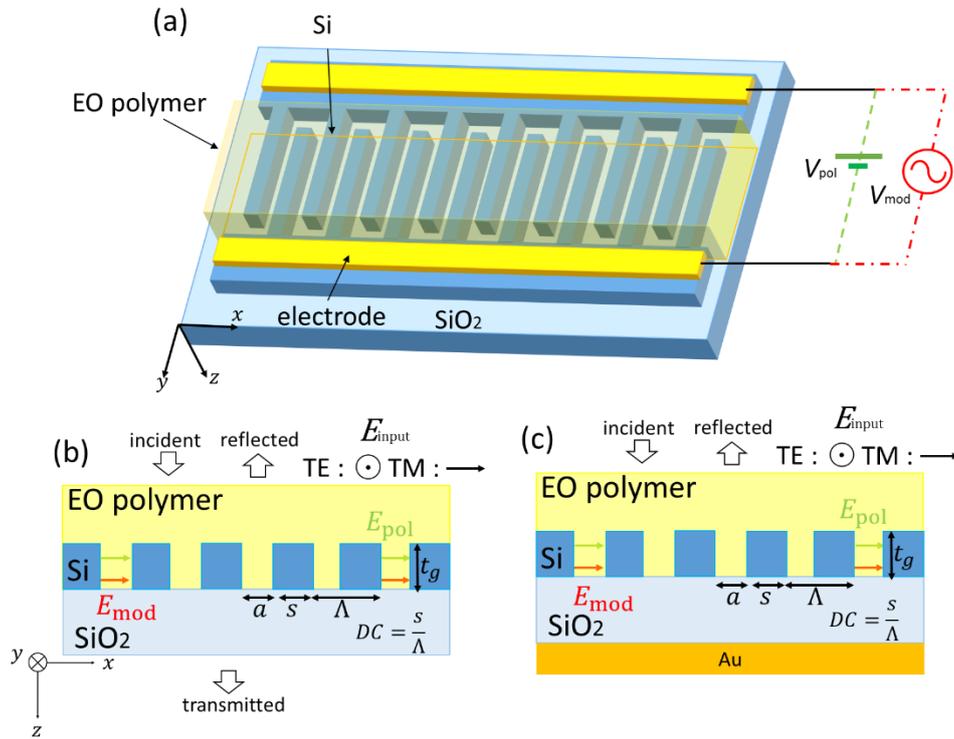


Fig. 1.8 Device structure proposed by previous research. (a) Bird's eye view, (b) Cross section of intensity modulator, (c) Cross section of phase modulator.

先行研究においての実証された強度変調器の性能について Fig. 1.9 にまとめる。測定された共振器の  $Q$  値は約 60 であり、シミュレーションで見積もられた  $Q$  値に比べて数桁小さくなっている。さらに強度変調器としての変調度もおよそ 5.3% であり、参考文献 31 などを実証されている変調度に比べて小さいため、さらなる変調度の向上が求められる。また、今回の実験における変調速度は最大で 50 MHz であり、これはデバイスの最適化がされていないのと同時に光学測定系も最適化がされていないことが原因でこの帯域にとどまっていると考えられる。

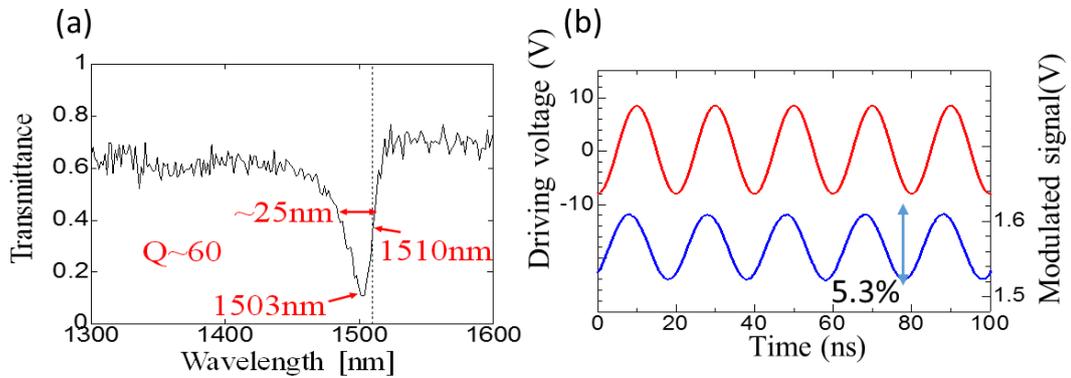


Fig. 1.9 Previous research result. (a) Resonance spectrum, in which Q-factor is about 60 at 1503 nm  
 (b) Dynamic modulation using 20 V<sub>pp</sub>-AC (alternating current) voltage, in which modulation ratio is about 5.3% at 1503 nm.

## 1.7 本研究の目標

そこで、本研究の目標は先行研究で原理実証された強度変調器の性能を向上させることである。具体的には、Si グレーティングの共振 Q 値を向上させること、同時にポーリング条件等を見直すことで、強度変調器の変調度を大きくすること、さらには EO ポリマーを使用している理由の一つでもある、GHz 以上の高速な変調を実現することが挙げられる。

Q 値を向上させるためには、シミュレーションにおける構造により実際のデバイスを近づける必要があるため、ファブリケーションの条件出しを改めて行う必要があると考えられる。それと同時に、ファブリケーショントレランスの高い設計値を見つけ出すことも重要だと考えられる。変調度の向上には、Q 値の向上が直接効いてくるとともに、EO ポリマーの条件出しをし、理論値に近いような EO ポリマーの性能を実現する必要もある。さらに高速化のためには、デバイス構造の最適化をするとともに、光学測定の見直しも必要であると考えられるため、この両方の観点から改善を行っていく。

## 2 EO ポリマーの原理

### 2.1 EO ポリマーの概要

EO ポリマーを構成する EO 色素は Fig. 2.1 (a)のように電子ドナーと電子アクセプタが  $\pi$  電子共役系によって繋がった非対称な構造をしている[40]。もともとの EO 色素はランダムな方向を向き、全体としての非対称性を打ち消す構造となっている。この状態では変調に必要な EO 効果は持たない。そこで Fig. 2.1(b)に示すように、EO 色素分子の向きを揃えて全体に電氣的な非対称性を生み出すために、ポーリングという処理を行う。このポーリングを行うことにより、EO 色素がポーリング電界の向きに配向され、EO 効果を持つことになる[40]。

一般に EO 効果をもつ材料のことを EO 材料という。EO 材料の EO 効果による屈折率の変化量は、次節で詳しく説明するが、EO 係数  $r$  と物質の屈折率  $n$  を用いて、 $n^3r$  に比例することが分かっている、これを特性指数(Figure of merit ; FOM)とする。また、光波の位相差が  $\pi$  となるための電圧を半波長電圧  $V_\pi$  というが、これと変調器の電極長  $L$  との積は、

$$V_\pi L = \frac{\lambda d}{n^3 r} \quad (2.1)$$

と表され、この値が小さいほど、低電圧駆動が可能である。ただし、 $\lambda$  は真空での光の波長、 $d$  は電極間隔を表す。また、光通信には 10 GHz 以上の変調が必要であり、実際の光変調器では、変調信号であるマイクロ波を電極上で伝搬させる進行波型の光変調器が用いられていて、その変調帯域  $f$  と電極長  $L$  との積は、

$$fL = \frac{1.4c}{\pi |n_{\text{eff}} - \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}|} \quad (2.2)$$

で表される。 $c$  は光速、 $n_{\text{eff}}$  は光波の実行屈折率、 $\epsilon_{\text{eff}}$  はマイクロ波の実行誘電率である。

EO ポリマー以外にも様々な EO 材料が利用されているが、それぞれについて EO 係数  $r$ 、特性指数、半波長電圧、変調帯域の比較を Table 2.1 に示す。現在の EO ポリマーがほかの EO 材料に比べて低電圧駆動、高速動作の点で優れていることが分かる。

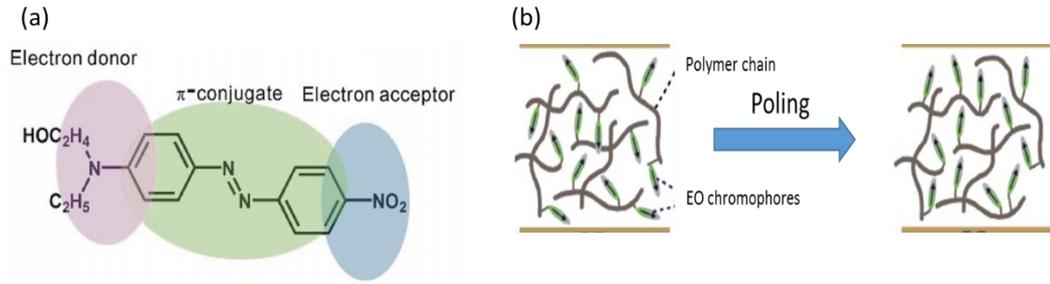


Fig. 2.1 (a)Schematic for EO chromophore, (b)Schematic for EO polymer and poling procedure[40].

Table 2.1 Performance of EO materials[40].

EO material	$r_{33}$ (pm/V)	$n^3r_{33}$	$V_{\pi}L$ (V · cm)	$fL$ (GHz · cm)
EO polymer	> 100	> 450	< 1	> 300
DAST	50	510	3	134
GaAs	1.5	64	1~5	56
LiNbO <sub>3</sub>	32	340	4.5	10

## 2.2 ポッケルス効果とポーリング

EO 効果とは、光が電場や電場の影響を受けている物質と相互作用するときの現象のことである。吸光度の変化には電界吸収効果やフランツ・ケルデッシュ効果などがあり、屈折率の変化にはポッケルス効果やカー効果などがある。背景の EO ポリマーの節でも説明したように、EO ポリマーは EO 効果を持つポリマー状の物質の総称であるが、EO ポリマーの持つ EO 効果は、ポッケルス効果である。これは 1 次の電気光学効果であり、2 次の非線形光学効果のうちの 1 つである。この節ではこのポッケルス効果について説明する[41]。

EO 係数は電界印可時の屈折率楕円体のひずみによって定義される。まず、屈折率楕円体は一般に、以下のように定義される。

$$B_{11}x^2 + B_{22}y^2 + B_{33}z^2 + 2B_{23}yz + 2B_{31}zx + 2B_{12}xy = 1 \quad (2.3)$$

屈折率楕円体は一般にテンソルで表され、ここで  $B$  は比誘電率テンソル(=  $\epsilon$ )の逆テンソルである( $B \cdot \epsilon = I$ ,  $I$ ; 単位テンソル)。電界印可がない時は、

$$B_{11}(0) = \frac{1}{\epsilon_x} = \frac{1}{n_x^2}, B_{22}(0) = \frac{1}{\epsilon_y} = \frac{1}{n_y^2}, B_{33}(0) = \frac{1}{\epsilon_z} = \frac{1}{n_z^2}, \quad (2.4)$$

$$B_{23}(0) = B_{31}(0) = B_{12}(0) = 0$$

このように表される。ここに電界  $E$  が印可されると、屈折率が変化することになるが、これが EO 効果である。EO 係数  $r$  は、電界印可時の  $B_{ij}$  の変化 ( $\Delta B_{ij} = B_{ij}(E) - B_{ij}(0)$ ) によって以下のように定義される。

$$\Delta B_{ij} = B_{ij}(E) - B_{ij}(0) = \sum_{k=1}^3 r_{ijk} E_k + \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 s_{ijkl} E_k E_l \quad (2.5)$$

ここで 3 階のテンソルである  $r_{ijk}$  を 1 次電気光学定数といい、ポッケルス係数ともいう。4 階のテンソルである  $s_{ijkl}$  を 2 次電気光学定数といい、カー係数ともいう。EO ポリマーではカー効果はポッケルス効果より十分に小さいと考えられるので、ここではポッケルス効果のみを考え、式(2.5)において右辺の第 1 項までを考える。

ここで、1 次の電気光学テンソル  $r_{ijk}$  は真性置換対称性により、 $i$  と  $j$  の交換に対して不変であり、Table 2.2 のように縮約することができる。

Table 2.2 Contraction of subscript.

ij	11	22	33	23,32	13,31	12,21
m	1	2	3	4	5	6

すると、式(2.5)は以下のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

ポーリングを 3 の方向(=z 軸方向)に行うことを考えると、EO ポリマーの対称性により [42]、

$$r_{13} = r_{23} = \frac{1}{3} r_{33}, r_{42} = r_{51} \quad (2.7)$$

となり、それ以外の  $r_{mk}$  は 0 になる。以上より、式(2.6)は、

$$\begin{pmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

とかけ、z 軸方向の電界  $E_z$  をかけると、屈折率楕円体の式(2.3)は、

$$\left(\frac{1}{n_x^2} + r_{13}E_z\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_y^2} + r_{23}E_z\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_z^2} + r_{33}E_z\right)z^2 = 1 \quad (2.9)$$

このようになる。よって、ポッケルス効果による屈折率変化 $\Delta n_i(i=x,y,z)$ は、

$$\begin{aligned} \Delta n_x &= n'_x - n_x = -\frac{1}{2}n_x^3 r_{13} E_z, \\ \Delta n_y &= n'_y - n_y = -\frac{1}{2}n_y^3 r_{23} E_z, \\ \Delta n_z &= n'_z - n_z = -\frac{1}{2}n_z^3 r_{33} E_z \end{aligned} \quad (2.10)$$

となり、複屈折を持つ屈折率変化を示すことが分かる。

## 2.3 EO ポリマーの性能

EO ポリマーの EO 係数  $r$  は前節で説明したようにテンソルとして定義されるが、その中で EO ポリマーの性能を表すのに重要な指標は  $r_{33}$  であり、次のように表される。

$$r_{33} = -\frac{2}{n^4} F \cdot N \langle \cos^3 \theta \rangle \cdot \beta \quad (2.11)$$

ここで  $n$  は屈折率、 $F$  はローレンツ・ローレンスの局所場補正関数、 $N$  は EO 色素の密度、 $\langle \cos^3 \theta \rangle$  は分子配向率の熱力学的平均、 $\beta$  は超分極率である。 $r_{33}$  を大きくするうえで重要な  $\beta$  と  $\langle \cos^3 \theta \rangle$  について考える。

まず、超分極率  $\beta$  についてだが、これは次式のように表される。

$$\beta = \frac{1}{3} \frac{\omega_{eg}^2(3\omega_{eg}^2 - \omega^2)}{(\omega_{eg}^2 - \omega^2)^2} \beta_0, \beta_0 = \frac{3}{2\varepsilon_0 \hbar^2} \frac{\Delta\mu \mu_{eg}^2}{\omega_{eg}^2} \quad (2.12)$$

ただし、 $\omega_{eg}$ は遷移周波数、 $\omega$ は光の周波数、 $\mu_{eg}$ は遷移双極子モーメント、 $\Delta\mu$ は励起状態と基底状態の双極子モーメントの差である。 $\beta$ を大きくするための手法としては、分子の極性を大きくすればよいことが $\beta_0$ の式より分かる。EO色素は電子ドナーと電子アクセプタが $\pi$ 電子共役系によって繋がった非対称な構造をしていると説明したが、このドナーとアクセプタによる作用が大きいくほど極性は大きくなる。1990年前半までは、Fig. 2.2(a)に示す、DR1というアクセプタにニトロ基、ドナーにアルキルアミノ基、 $\pi$ 共役系にはアゾベンゼンを用いた物質が主流であった。ただし、 $\beta$ は大きくなく、 $r_{33}$ も10 pm/V程度であった。そこで1999年に開発された、Fig. 2.2(b)に示すFTCはアクセプタにトリシアノフラン(TCF)を用いていて、このアクセプタ基の電子吸引能力が大きかったため、 $\beta$ はDR1の7.8倍に向上した。その後も様々なアクセプタ基、ドナー基の改良が進められていった[35]。

次に、 $\langle \cos^3 \theta \rangle$ を悪化させないような条件で、 $N$ を大きくするための方法として、サイドチェーンポリマーが開発された[35]。これは、従来のゲスト/ホストポリマーというEO色素とポリマーを単純に混合した構造において、EO色素をポリマー鎖と結合した構造である。これにより配向の安定性が高まり、 $N\langle \cos^3 \theta \rangle$ を大きくできる。

有機材料の特徴は、分子の組み合わせにより、上記の値を変化させられることであり、これらの方法によりEO係数 $r_{33}$ を大きくできる。そのためLNなどの無機材料よりも大きな $r_{33}$ が得られ、低電圧駆動が可能となる。

また、式(2.2)に示す変調帯域 $f$ についてLNは、強誘電性を示すイオン結晶であり、イオン分極によりEO効果が発現する。よって、マイクロ波周波数において、イオン分極の影響を強く受け、マイクロ波の屈折率が光に比べて大きくなってしまふ。そのため、変調帯域が制限される。一方、EOポリマーは有機材料であり、電子分極によりEO効果が発現するため、イオン分極の影響が小さくなり、屈折率分散が小さい。よって、変調帯域 $f$ を大きくすることができる[35]。

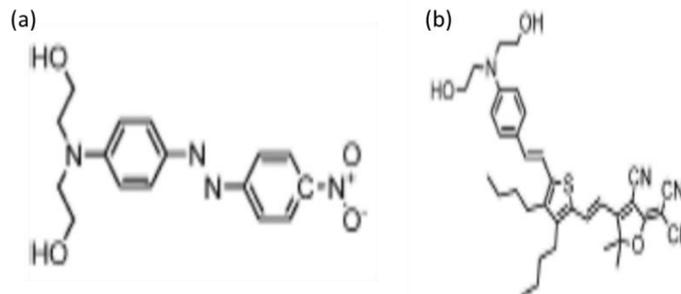


Fig. 2.2 Examples of EO chromophore. (a) DR1, (b)FTC[43].

## 2.4 本研究に用いた EO ポリマー

本研究で用いる EO ポリマーは国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)より共同研究として提供していただいたものであり先行研究[39]にて用いられたものと同等のものである。分子構造を Fig. 2.3 に示す。EO 係数は NICT にて透過型エリプソメトリ法により測定されていて、ポーリング温度  $T_p=128^\circ\text{C}$ 、ポーリング電界  $E_p=140\text{ V}/\mu\text{m}$  の時に、波長  $1550\text{ nm}$  で  $89\text{ pm}/\text{V}$  である。

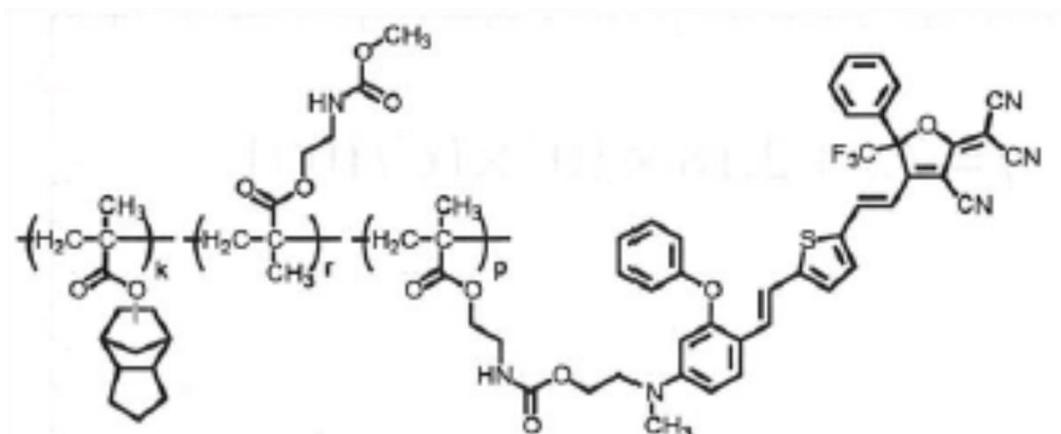


Fig. 2.3 EO polymer used for this work[39].

## 3 HCG の原理

### 3.1 HCG の概要

グレーティング構造（回折格子構造）は光学分野において多く利用されている。従来は、グレーティングの周期が入射波の波長よりも大きい回折領域や、周期が波長より十分に小さいディープサブ波長領域において、ホログラフィーや分光装置、各種ナノフォトニクスデバイスなどに応用されていた[44,45]。一方で、グレーティングの周期が入射波の波長と同程度以下に設定したものをサブ波長グレーティングといい、従来のグレーティングでは得られなかった、超広帯域ミラーや光アイソレーター等に応用することができる。[46-48]。

ここで、グレーティングとそれを取り囲む物質の屈折率差が大きいサブ波長グレーティングを高屈折率差グレーティング（High contrast grating ; HCG）という。HCG の特徴として、超高反射率や超高 Q 値の共振構造を実現することができることが挙げられる[47-49]。超高反射率を実現することで、VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting LASER)において使われている DBR(Distributed Bragg Reflector)に代わる形でミラーとして用いられている[49]。また、高 Q 値の共振構造を実現することで、我々の研究と同様に光変調器としての応用も考えられている[7,3138,39]。

### 3.2 計算に用いる HCG の構造

HCG 構造については、参考文献[50]においてマクスウェル方程式に基づいて厳密に計算されているため、これを参考にして計算手法を紹介する。Fig. 3.1 に示す HCG 構造について計算する。図に示す  $z$  方向を光の伝搬方向、 $x$  方向をグレーティングの周期が繰り返される方向とし、 $y$  方向には一様であるとする。図に示すように HCG 内部は  $y$  方向に一様な無限周期のスラブ導波路アレイとして考えることができる。 $z$  方向に沿って、領域を Region I、Region II、Region III と分け、Region I、III を一様な物質、II をサブ波長グレーティングが占める領域と定める。Region I、III はそれぞれ  $-z$ 、 $z$  方向に無限に続くとしている。Region I と II の境界を  $z = 0$  とし、Region II の厚さを  $t_g$  と定める。Region I、III の屈折率は  $n_1$ 、 $n_3$  であり、Region II の高屈折率媒質の屈折率を  $n_2$ 、低屈折率媒質の屈折率を  $n_{\text{bar}}$  とする。周期は  $A$ 、高屈折率媒質の幅は  $s$ 、低屈折率媒質の幅は  $a$  とする。電界がグレーティングに平行な光を TE 光と定義し、今回は入射波として TE モードの平面波を用いることとする。TE 光を用いる理由としては、TE 光を用いるほうが TM 光に対してよりグレーティング領域の膜厚を小さくでき、プロセスを単純化することができることなどが挙げられるが、詳しい議論は参考文献 39 にてなされているため、そちらを参考いただきたい。また、 $z$  方向の伝搬定数は  $\gamma$  や  $\beta$  で表すとして、上付き文字が各領域 (Region I ~ Region

III)を表し、下付き文字がモード数( $m, n$ )を表す。さらに、Region II の  $x$  方向の波数は高屈折率媒質中では  $k_s$ 、低屈折率媒質中では  $k_a$  と表すとする。真空中の波数は  $k_0$  である。

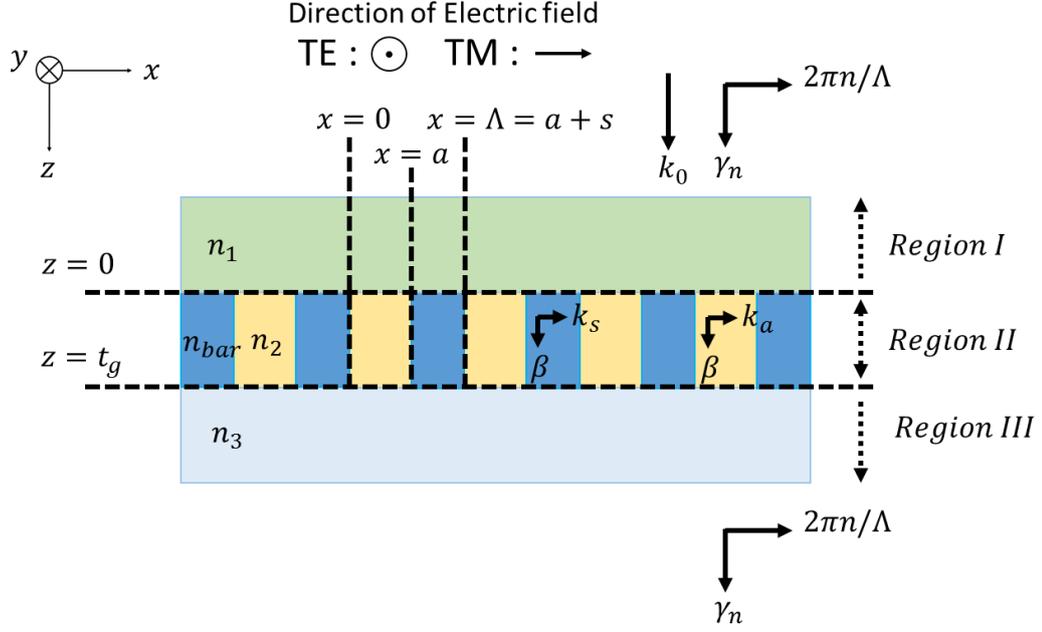


Fig. 3.1 HCG structure.

### 3.3 モード解析

入射波として平面波を仮定しているため、Region I における入射波は、 $x, y$  方向に一樣で、 $z$  方向に垂直に入射する、波数が  $m_1 k_0$  の平面波である。Region I と Region II の境界において、入射波の一部は反射され散乱されるが、周期構造により反射光の  $x$  方向の波数は  $n$  を整数として、 $2n\pi/\Lambda$  であるため、 $z$  方向の波数は以下のように表すことができる。

$$\gamma_n^I = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \left(\frac{2n\pi}{\Lambda}\right)^2} \quad (3.1)$$

ここではグレーティング構造はサブ波長グレーティングであり、真空中の波長を  $\lambda (= 2\pi/k_0)$  とすると、Region I での波長  $\lambda/n_1$  は、 $\Lambda < \lambda/m$  としてよい。このとき、 $n \neq 0$  の時に、 $\gamma_n^I$  は純虚数となり、 $n=0$  のときは  $m_1 k_0$  となる。したがって、 $n=0$  以外の散乱光は減衰し、 $n=0$  の反射光のみが伝搬する。これと同様に、Region III において、 $\Lambda < \lambda/m_3$  が成立すると仮定してよく、 $n=0$  以外の散乱光は減衰し、 $n=0$  の透過光のみが伝搬する。このように、高次の散乱光が減衰により伝搬しないことはサブ波長グレーティングの特徴の一つである。

電界  $\mathbf{E}$ 、磁束密度  $\mathbf{D}$ 、磁界  $\mathbf{H}$ 、磁束密度  $\mathbf{B}$  について、マクスウェル方程式は以下のようになる。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.3)$$

真空の誘電率  $\epsilon_0$ 、真空の透磁率  $\mu_0$  であり、屈折率が  $n$  の物質を考えると以下が成り立つ。

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{D} = n^2 \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{J} = 0 \quad (3.6)$$

各周波数  $\omega$  の平面波を考えると、

$$\mathbf{E} = \mathbf{E} \exp(j\omega t) \quad (3.7)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H} \exp(j\omega t) \quad (3.8)$$

これらを代入すると、以下のようになる。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mu_0 \mathbf{H} \quad (3.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \omega \epsilon_0 n^2 \mathbf{E} \quad (3.10)$$

伝搬定数  $\beta$  で  $z$  方向に伝搬するとき、

$$\mathbf{E} = \mathbf{E} \exp(-j\beta z) \quad (3.11)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H} \exp(-j\beta z) \quad (3.12)$$

となる。

$$\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z) \quad (3.13)$$

$$\mathbf{H} = (H_x, H_y, H_z) \quad (3.14)$$

として、スカラーで各成分を考えると、 $y$  方向に媒質が一様な時、 $d/dy = 0$  であり、以下のように表される。

$$j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \quad (3.15)$$

$$-j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (3.17)$$

$$j\beta H_y = j\omega\varepsilon_0 n^2 E_x \quad (3.18)$$

$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\varepsilon_0 n^2 E_y \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = j\omega\varepsilon_0 n^2 E_z \quad (3.20)$$

(3.15)、(3.17)、(3.19)が TE モード、(3.16)、(3.18)、(3.20)が TM モードの各偏光を表す。ここでは TE モードについて解析するので、(3.15)、(3.17)、(3.19)式について考える。

以下で各 Region における電磁界を具体的に記述していく。

Region I について、 $H_x^I$ 、 $E_y^I$  はそれぞれ n 次の電磁界モード  $\mathcal{H}_{x,n}^I$ 、 $\mathcal{E}_{y,n}^I$  の線形結合を表すとして、

$$H_x^I(x, z) = \mathcal{H}_{x,0}^I(x) e^{-j\gamma_0^I z} - \sum_{n=0}^{\infty} r_n \mathcal{H}_{x,n}^I(x) e^{j\gamma_n^I z} \quad (3.21)$$

$$E_y^I(x, z) = \mathcal{E}_{y,0}^I(x) e^{-j\gamma_0^I z} + \sum_{n=0}^{\infty} r_n \mathcal{E}_{y,n}^I(x) e^{j\gamma_n^I z} \quad (3.22)$$

$$\mathcal{H}_{x,n}^I(x) = \cos\left(\frac{2n\pi}{\Lambda}\left(x - \frac{a}{2}\right)\right) \quad (3.23)$$

$$\mathcal{E}_{y,n}^I(x) = -\frac{k_0}{\gamma_n^I} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cos\left(\frac{2n\pi}{\Lambda}\left(x - \frac{a}{2}\right)\right) \quad (3.24)$$

$$\gamma_n^I = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \left(\frac{2n\pi}{\Lambda}\right)^2} \quad (3.25)$$

となる。 $r_n$  は複素反射係数である。これと同様にして、Region III では、

$$H_x^{\text{III}}(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \tau_n \mathcal{H}_{x,n}^{\text{III}}(x) e^{-j\gamma_n^{\text{III}}(z-t_g)} \quad (3.26)$$

$$E_y^{\text{III}}(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \tau_n \mathcal{E}_{y,n}^{\text{III}}(x) e^{-j\gamma_n^{\text{III}}(z-t_g)} \quad (3.27)$$

$$\mathcal{H}_{x,n}^{\text{III}}(x) = \cos\left(\frac{2n\pi}{\Lambda}\left(x - \frac{a}{2}\right)\right) \quad (3.28)$$

$$\mathcal{E}_{y,n}^{\text{III}}(x) = -\frac{k_0}{\gamma_n^{\text{III}}} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cos\left(\frac{2n\pi}{\Lambda}\left(x - \frac{a}{2}\right)\right) \quad (3.29)$$

$$\gamma_n^{\text{III}} = \sqrt{n_3^2 k_0^2 - \left(\frac{2n\pi}{\Lambda}\right)^2} \quad (3.30)$$

となる。ここで  $\tau_n$  は複素透過係数である。

一方で、**Region II** においては、高屈折率媒質と低屈折率媒質が交互に周期的に並んでいるため、この  $x$  方向の周期的境界条件も考えることによって、以下のように表すことができる。

$$H_x^{\text{II}}(x, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{H}_{x,m}^{\text{II}}(x) (a_m e^{-j\beta_m(z-t_g)} - b_m e^{j\beta_m(z-t_g)}) \quad (3.31)$$

$$E_y^{\text{II}}(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \mathcal{E}_{y,m}^{\text{II}}(x) (a_m e^{-j\beta_m(z-t_g)} + b_m e^{j\beta_m(z-t_g)}) \quad (3.32)$$

$$H_z^{\text{II}}(x, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{H}_{z,m}^{\text{II}}(x) (a_m e^{-j\beta_m(z-t_g)} - b_m e^{j\beta_m(z-t_g)}) \quad (3.33)$$

$$\mathcal{H}_{x,m}^{\text{II}}(x) = \begin{cases} \cos\left(\frac{k_{s,m}S}{2}\right) \cos\left(k_{a,m}\left(x - \frac{a}{2}\right)\right) & (0 < x < a) \\ \cos\left(\frac{k_{a,m}a}{2}\right) \cos\left(k_{s,m}\left(x - \frac{a+\Lambda}{2}\right)\right) & (a < x < \Lambda) \end{cases} \quad (3.34)$$

$$\mathcal{E}_{y,m}^{\text{II}}(x) = \begin{cases} -\frac{k_0}{\beta_m} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cos\left(\frac{k_{s,m}S}{2}\right) \cos\left(k_{a,m}\left(x - \frac{a}{2}\right)\right) & (0 < x < a) \\ -\frac{k_0}{\beta_m} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cos\left(\frac{k_{a,m}a}{2}\right) \cos\left(k_{s,m}\left(x - \frac{a+\Lambda}{2}\right)\right) & (a < x < \Lambda) \end{cases} \quad (3.35)$$

$$\mathcal{H}_{z,m}^{\text{II}}(x) = \begin{cases} j \frac{k_{a,m}}{\beta_m} \cos\left(\frac{k_{s,m}S}{2}\right) \sin\left(k_{a,m}\left(x - \frac{a}{2}\right)\right) & (0 < x < a) \\ j \frac{k_{s,m}}{\beta_m} \cos\left(\frac{k_{a,m}a}{2}\right) \sin\left(k_{s,m}\left(x - \frac{a + \Lambda}{2}\right)\right) & (a < x < \Lambda) \end{cases} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \beta_m &= \sqrt{n_{\text{bar}}^2 k_0^2 - k_{a,m}^2} = \sqrt{n_2^2 k_0^2 - k_{s,m}^2} \\ k_{s,m}^2 - k_{a,m}^2 &= k_0^2(n_2^2 - n_{\text{bar}}^2) \\ k_{s,m} \tan\left(\frac{k_{s,m}S}{2}\right) &= -k_{a,m} \tan\left(\frac{k_{a,m}a}{2}\right) \end{aligned} \quad (3.37)$$

ここで、 $a_m$ 、 $b_m$ はそれぞれ+z方向、-z方向の複素伝搬係数である。

各 Region における電磁界分布が計算されたので、各境界における境界条件を考えることによって、反射係数、透過係数、伝搬係数を求めていく。

Region I と Region II の境界条件は

$$H_x^{\text{I}}(x, 0) = H_x^{\text{II}}(x, 0) \quad (3.38)$$

$$E_y^{\text{I}}(x, 0) = E_y^{\text{II}}(x, 0) \quad (3.39)$$

より、これと式(3.21)-(3.25), (3.31)-(3.37)より、

$$\sum_{n=0}^{\infty} (\delta_{n,0} - r_n) \mathcal{H}_{x,n}^{\text{I}}(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{H}_{x,m}^{\text{II}}(x) (a_m e^{j\beta_m t_g} - b_m e^{-j\beta_m t_g}) \quad (3.40)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (\delta_{n,0} + r_n) \mathcal{E}_{y,n}^{\text{I}}(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{E}_{y,m}^{\text{II}}(x) (a_m e^{j\beta_m t_g} + b_m e^{-j\beta_m t_g}) \quad (3.41)$$

この両式の左から、 $\Lambda^{-1} \int_0^\Lambda \mathcal{H}_{x,n}^{\text{I}}(x) dx$ と $\Lambda^{-1} \int_0^\Lambda \mathcal{E}_{y,n}^{\text{I}}(x) dx$ を作用させると、

$$\Lambda^{-1} \int_0^\Lambda \mathcal{H}_{x,m}^{\text{I}}(x) \mathcal{H}_{x,n}^{\text{I}}(x) dx = \begin{cases} 1 & (m = n = 0) \\ \frac{1}{2} & (m = n \neq 0) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases} \quad (3.42)$$

$$\Lambda^{-1} \int_0^\Lambda \mathcal{E}_{y,m}^I(x) \mathcal{E}_{y,n}^I(x) dx = \begin{cases} \left( \frac{k_0}{\gamma_n^I} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \right)^2 & (m = n = 0) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{k_0}{\gamma_n^I} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \right)^2 & (m = n \neq 0) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases} \quad (3.43)$$

これより、

$$\frac{1}{2 - \delta_{n,0}} (\delta_{n,0} - r_n) = \sum_{m=0}^{\infty} (a_m e^{j\beta_m t_g} - b_m e^{-j\beta_m t_g}) \Lambda^{-1} \int_0^\Lambda \mathcal{H}_{x,m}^{II}(x) \mathcal{H}_{x,m}^I(x) dx \quad (3.44)$$

$$\frac{1}{2 - \delta_{n,0}} \left( \frac{k_0}{\gamma_n^I} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \right)^2 (\delta_{n,0} + r_n) = \sum_{m=0}^{\infty} (a_m e^{-j\beta_m t_g} + b_m e^{j\beta_m t_g}) \Lambda^{-1} \int_0^\Lambda \mathcal{E}_{y,m}^{II}(x) \mathcal{E}_{y,n}^I(x) dx \quad (3.45)$$

これらを用いて、 $H_{nm}^I$ 、 $E_{nm}^I$ を計算すると、

$$h_{\text{air}} = \Lambda^{-1} (2 - \delta_{n,0}) \cos\left(\frac{k_s s}{2}\right) \left( \frac{\sin\left(\frac{k_a a}{2} - \frac{2n\pi a}{\Lambda}\right)}{k_a - \frac{2n\pi}{\Lambda}} + \frac{\sin\left(\frac{k_a a}{2} + \frac{2n\pi a}{\Lambda}\right)}{k_a + \frac{2n\pi}{\Lambda}} \right) \quad (3.46)$$

$$h_{\text{bar}} = \Lambda^{-1} (2 - \delta_{n,0}) \frac{1}{2} \cos\left(\frac{k_a a}{2}\right) \left( \left( \frac{\sin\left(\frac{k_s s}{2} - \frac{2n\pi}{\Lambda} (\Lambda - \frac{a}{2})\right)}{k_s - \frac{2n\pi}{\Lambda}} + \frac{\sin\left(\frac{k_s s}{2} + \frac{2n\pi}{\Lambda} (\Lambda - \frac{a}{2})\right)}{k_s + \frac{2n\pi}{\Lambda}} \right) - \left( \frac{\sin\left(-\frac{k_s s}{2} - \frac{2n\pi a}{\Lambda}\right)}{k_s - \frac{2n\pi}{\Lambda}} + \frac{\sin\left(-\frac{k_s s}{2} + \frac{2n\pi a}{\Lambda}\right)}{k_s + \frac{2n\pi}{\Lambda}} \right) \right) \quad (3.47)$$

と定義すると、以下のように表すことができる。

$$\mathbf{H}_{n,m}^I = h_{\text{air}} + h_{\text{bar}} \quad (3.48)$$

$$\mathbf{E}_{n,m}^I = \frac{\gamma_n^I}{\beta_m} (h_{\text{air}} + h_{\text{bar}}) \quad (3.49)$$

ここで、行列表現として各パラメータを以下のように定義する。

$$\mathbf{i} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix}, \mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ \vdots \end{pmatrix} = \mathbf{R}\mathbf{i}, \boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_0 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \end{pmatrix} = \mathbf{T}\mathbf{i}, \mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \boldsymbol{\rho}\mathbf{a},$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{pmatrix} e^{-j\beta_0 t_g} & 0 & 0 & \\ 0 & e^{-j\beta_1 t_g} & 0 & \\ 0 & 0 & e^{-j\beta_2 t_g} & \\ & & & \ddots \end{pmatrix} \quad (3.50)$$

ここで $\phi$ は距離  $t_g$  を  $z$  方向に伝搬したときの位相変化を示している。これらより、

$$\mathbf{i} - \mathbf{r} = \mathbf{H}^I(\boldsymbol{\Phi}^{-1}\mathbf{a} - \boldsymbol{\Phi}\mathbf{b}) \quad (3.51)$$

$$\mathbf{i} + \mathbf{r} = \mathbf{E}^I(\boldsymbol{\Phi}^{-1}\mathbf{a} + \boldsymbol{\Phi}\mathbf{b}) \quad (3.52)$$

となる。Region II と Region III の境界においても同様の境界条件、同様の計算を行うことで、

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}^{III}(\mathbf{a} - \mathbf{b}) = \mathbf{E}^{III}(\mathbf{a} + \mathbf{b}) \quad (3.53)$$

$$\boldsymbol{\rho} = (\mathbf{H}^{III} + \mathbf{E}^{III})^{-1}(\mathbf{H}^{III} - \mathbf{E}^{III}) \quad (3.54)$$

が成立する。これらをまとめると、

$$\mathbf{R} = (\mathbf{E}^I + \mathbf{E}^I\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\rho}\boldsymbol{\Phi} - \mathbf{H}^I + \mathbf{H}^I\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\rho}\boldsymbol{\Phi})(\mathbf{H}^I - \mathbf{H}^I\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\rho}\boldsymbol{\Phi} + \mathbf{E}^I + \mathbf{E}^I\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\rho}\boldsymbol{\Phi})^{-1} \quad (3.55)$$

$$\mathbf{T} = (2\mathbf{E}^{III}\boldsymbol{\Phi} + \mathbf{E}^{III}\boldsymbol{\rho}\boldsymbol{\Phi})(\mathbf{H}^I - \mathbf{H}^I\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\rho}\boldsymbol{\Phi} + \mathbf{E}^I + \mathbf{E}^I\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\rho}\boldsymbol{\Phi})^{-1} \quad (3.56)$$

このようになる。以上により、3層のHCG構造における厳密な反射率及び透過率が求められる。

### 3.4 共振条件

HCGは先に説明したように、超高反射率や超高Q値の共振構造を実現することができる。今回の強度変調器に必要なのは、高Q値の共振構造であるので、どのような条件が成立していれば共振構造が実現できるのかを説明する。

HCGの共振はファブリペロー(Fabry-Pérot; FP)共振から類推して考えることができるが、その中でのモードの振る舞いは大きく異なっている。FP共振の場合は、共振器内にて存在するモードはそれぞれ直交していて、入射面や透過面において互いに結合しあうなど干渉をおこすことはない。一方で、HCG内のモードは、入射面や透過面において屈折率の分布の変化が大きいため強く干渉する。よって、HCGにおいて共振を発生させるためには、入射面時点のモードと、そこから透過面に伝搬し、再び入射面に戻ってくる一周分分の伝搬の中で各界面において互いに干渉を受けたモ

ードとが同じモードとなっていればよい。このように各境界で干渉しあうモードのことをまとめて **supermode** という。

入射面における **supermode** の係数を以下のように定義する。

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (3.57)$$

また、**Region I** と **Region III** の物質が異なるため、**Region II** からそれぞれ **Region I**、**Region III** の方向への反射係数はそれぞれ異なり、以下のように定義する。

$$\mathbf{b} = \rho_0 \mathbf{a}, \quad \mathbf{a} = \rho_1 \mathbf{b} \quad (3.58)$$

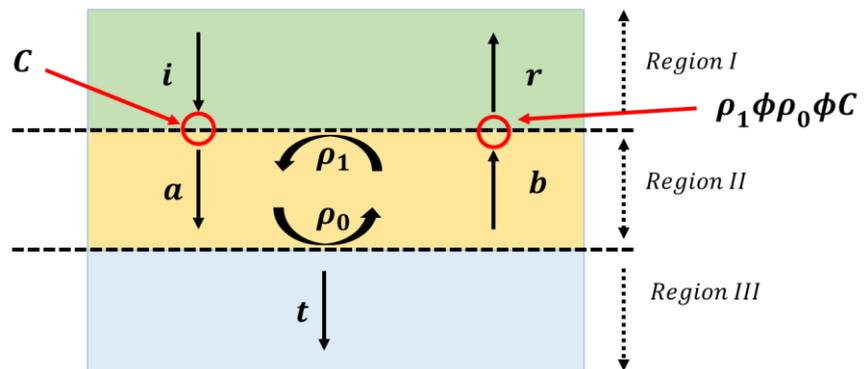
すると、**Fig. 3.2** のようにモードが変化していき、以下の式を満たしたときに共振が発生する。

$$\mathbf{C} = \rho_1 \Phi \rho_0 \Phi \mathbf{C} \quad (3.59)$$

よって、単位行列 **I** を用いて、

$$\det(\mathbf{I} - \rho_1 \Phi \rho_0 \Phi) = 0 \quad (3.60)$$

が成り立つときに、共振が発生する。



**Fig. 3.2** Mode change during one period of supermodes.

### 3.5 Dual-mode

グレーティング周期  $\Lambda$  により規格化した波長  $\lambda$  とグレーティング高さ  $t_g$  に対する反射率を表すカラーマップを Fig. 3.3(a) に示す。ここでは  $DC = 0.5$  としている。図に示すように図中央のチェッカーボードのような模様を示す領域を **Dual modes** 領域という。この領域では前節の **supermode** が 2 つ存在していて共振が存在する。共振波長が  $1550 \text{ nm}$  としたときの赤点線 AB による断面のグラフを Fig. 3.3(b) に示すが、**Dual modes** 領域内において大きな共振が生じていることが分かる。一方、図右側の領域を **Single mode** 領域といい、モードが一つだけ存在し、図左側では 3 つ以上のモードが存在している領域である。さらに、Fig. 3.3(c) には Fig. 3.3(a) の領域 C 内の共振点における電界強度分布を示しているが、強くグレーティング内に光が閉じ込められている様子が分かる。

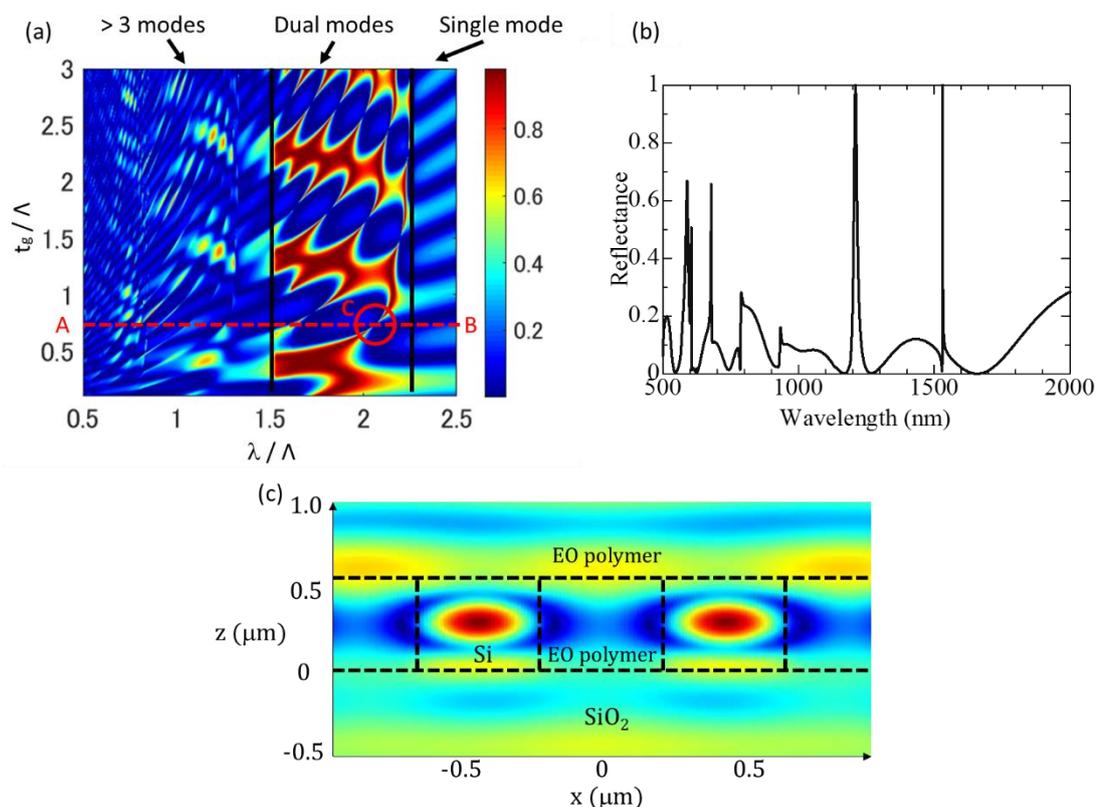


Fig. 3.3 (a)The relationship between the thickness  $t_g$  of the grating and the reflectance spectrum when  $DC = 0.5$ , (b)Reflectance spectrum when  $\Lambda = 738 \text{ nm}$ ,  $t_g = 554 \text{ nm}$ ,  $DC = 0.5$ , (c)Electrical field intensity distribution in area C.

## 4 シミュレーション

### 4.1 シミュレーション手法

高  $Q$  値な共振をもつ HCG 構造の決定のためにシミュレーションを行った。主に2種類の手法を用いてシミュレーションを行ったのでそれぞれについて簡単に説明する。まず1つ目は、原理の章において説明した、固有モード展開法に倣った手法である。参考文献[51]に `matlab` を用いて作製されたプログラムがあるので、これを一部改造して3層構造の HCG の共振についてシミュレーションをした。2つ目は、**FDTD**(Finite-difference time-domain)法を用いた数値シミュレーションである。これは `lumerical` 社の商用ソフトを用いた。前者を用いる利点としては、マクスウェル方程式を解析的に解くことで各モードの分布を計算していて、その式の展開の途中に近似を用いないため、厳密解を得られるところや、後者に比べて、比較的短時間で計算が終わることが挙げられる。一方、この手法は原理の章で紹介したような、理想的な直方体による周期構造にしか計算することができないので、いびつな形のグレーティング構造等は計算できない点と、周期が無限に続くという仮定をしているため、現実の有限周期のものとは誤差が出うる点が短所であるといえる。一方、後者の **FDTD** 法は多数のメッシュで区切られた空間について、マクスウェル方程式の微分方程式を差分方程式に展開することで、あるメッシュから逐次的に解を決定していく方法であるのだが、より正確な解を得ようとするとメッシュを細かく区切る必要があり、膨大な計算量が必要となるため、解析的な計算に比べて時間が長くなるという欠点がある。ただし、近似を用いた数値解析であるため、解析的に解が出ない構造に対しても計算をすることができる点や、有限な周期の構造についての計算を比較的正確に行うことができる点は、前者の手法に対する利点であると考えられる。

グレーティングの側面が垂直で理想的な形であり、有限の周期だが周期数が多くて無限周期と考えても良い場合は、`matlab` によるモード展開による解析を用いるが、プロセスを進めるうえで、グレーティングの側面を完全に垂直にするのは難しく一定の角度がついてしまうというのが分かったのだが、この際の構造や、周期の数が少ない時の有限周期構造を計算する際には **FDTD** 法による数値シミュレーションを用いることにした。

### 4.2 グレーティング角度の影響

前節でも触れたが、作製誤差によりグレーティングの形状が理想的な形からずれたとすると、共振スペクトルも当然変化する。そのような作製誤差に対しての性能のトレランスを向上させることが重要な課題の一つであるが、今回の **Si-HCG** 構造の作製にあたって、大きな作製誤差となりうるのは **Fig. 4.1(a)**に示すような、**Si** グレーティ

ング幅  $s$ 、高さ  $t_g$ 、グレーティング側面の角度  $\theta$  であることが後述の条件出し等で分かった。幅  $s$  については条件出しをしたうえで、同一サンプル上に所望の設計値とその周辺の値を持つデバイスを作製すれば、所望の設計値のデバイスが得られる可能性が高い。一方で、高さ  $t_g$  と角度  $\theta$  については同一サンプル上ではすべてのデバイスがほぼ同じ値となってしまいうため、事前の条件出しがより重要になってくる。ただし、高さ  $t_g$  については、 $t_g = 570 \text{ nm}$  以下、つまり Si 層が堀切れていない状態では、グレーティング自身が電極の役割も担う今回の研究の設計では変調器に用いることができない。よって、むしろ下側の  $\text{SiO}_2$  層までオーバーエッチングした場合の変化を考えることが重要である。Fig. 4.1 (b) にその際のオーバーエッチング深さ  $h$  を示す。また、Fig. 4.2 にオーバーエッチングの有無、及びグレーティング角度の変化における共振スペクトルの変化を示す。このグラフから分かるように、角度の変化に対して、オーバーエッチングの有無の Q 値やその時の共振波長に対する影響はとても小さいことが分かる。さらに、プロセスの章でも説明するように、高さ  $t_g$  やオーバーエッチング深さ  $h$  はエッチング時間のみにより制御可能であるが、角度  $\theta$  は数種類のパラメータが影響を与えるため、比較的條件出しが複雑となる。よって、今回はより角度のパラメータの変化に注目して設計を進めることとした。

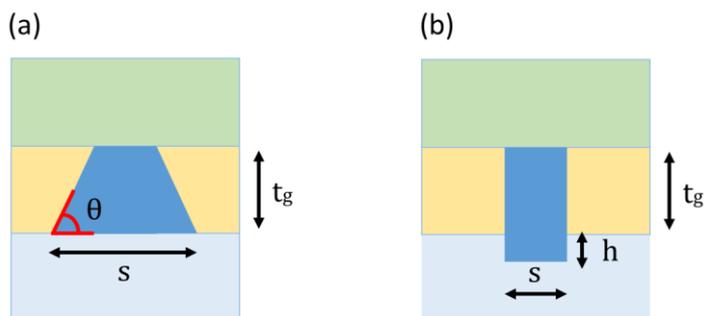


Fig. 4.1 Not ideal Si grating structure, (a) Structure with an angle on the side of the grating, (b) Overetched structure up to  $\text{SiO}_2$  layer.

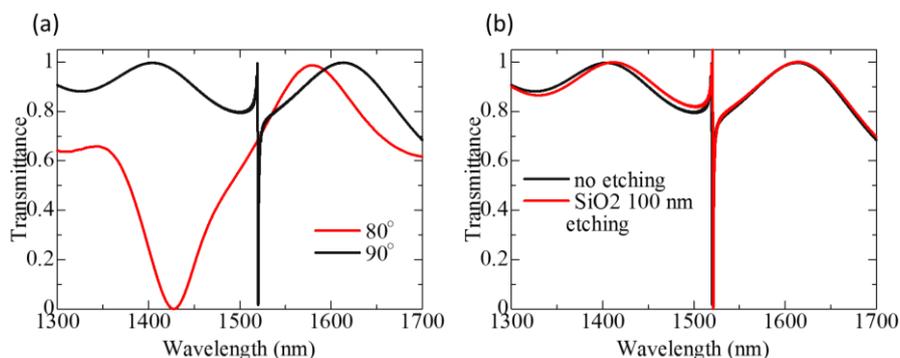


Fig. 4.2 (a) Transmittance spectrum when the side of the grating is angled, (b) Transmittance spectrum when  $\text{SiO}_2$  layer is overetched.

### 4.3 高 Q 値構造の決定

先行研究により現在当研究室の所有する SOQ 基板の膜厚は  $570 \mu\text{m}$  と決定されていた。理想的なグレーティングの Q 値はグレーティング周期  $A$ 、グレーティング幅  $s$  及びグレーティング高さ  $t_g$  によって決定される。 $t_g = 570 \text{ nm}$  と固定なので、 $A$  と  $s$  を変化させることで高 Q 値グレーティングを設計する。さらに、前節で述べたように角度の変化に対する Q 値の変化も考慮する必要がある。よって、グレーティング周期  $A$ 、グレーティング幅  $s$ 、角度  $\theta$  の 3 つのパラメータを変化させた際の Q 値を求めることにした。また、 $s$  の変化は周期  $A$  に対する  $s$  の割合の値である DC(Duty cycle) の変化に等しいので、 $A = 600 \text{ nm} \sim 870 \text{ nm}$ 、 $\text{DC} = 0.4 \sim 0.8$  と変化させた際の各角度の Q 値のカラーマップを Fig. 4.3 に示す。各角度のカラーマップを見ると、同じ周期、DC の値の時、必ずしもグレーティングが  $90^\circ$  の時が高 Q 値であるとは限らず、各角度でそれぞれ高 Q 値を持つエリアがあることが分かる。数千の Q 値を持つ高 Q 値のエリアが三日月の帯状に広がっていて、 $80^\circ$  から  $90^\circ$  まで角度が大きくなるにつれて、右下の方向（周期大、DC 小の方向）に移動していることが分かる。条件出しにおいては、より垂直な構造を作製することを目標とした。ただし、実際のデバイスを作製するときは垂直な構造の設計値だけではなく、その時の条件出しの際のグレーティング角度の傾向を見たとうえで、その角度の時の設計値も参考にした。

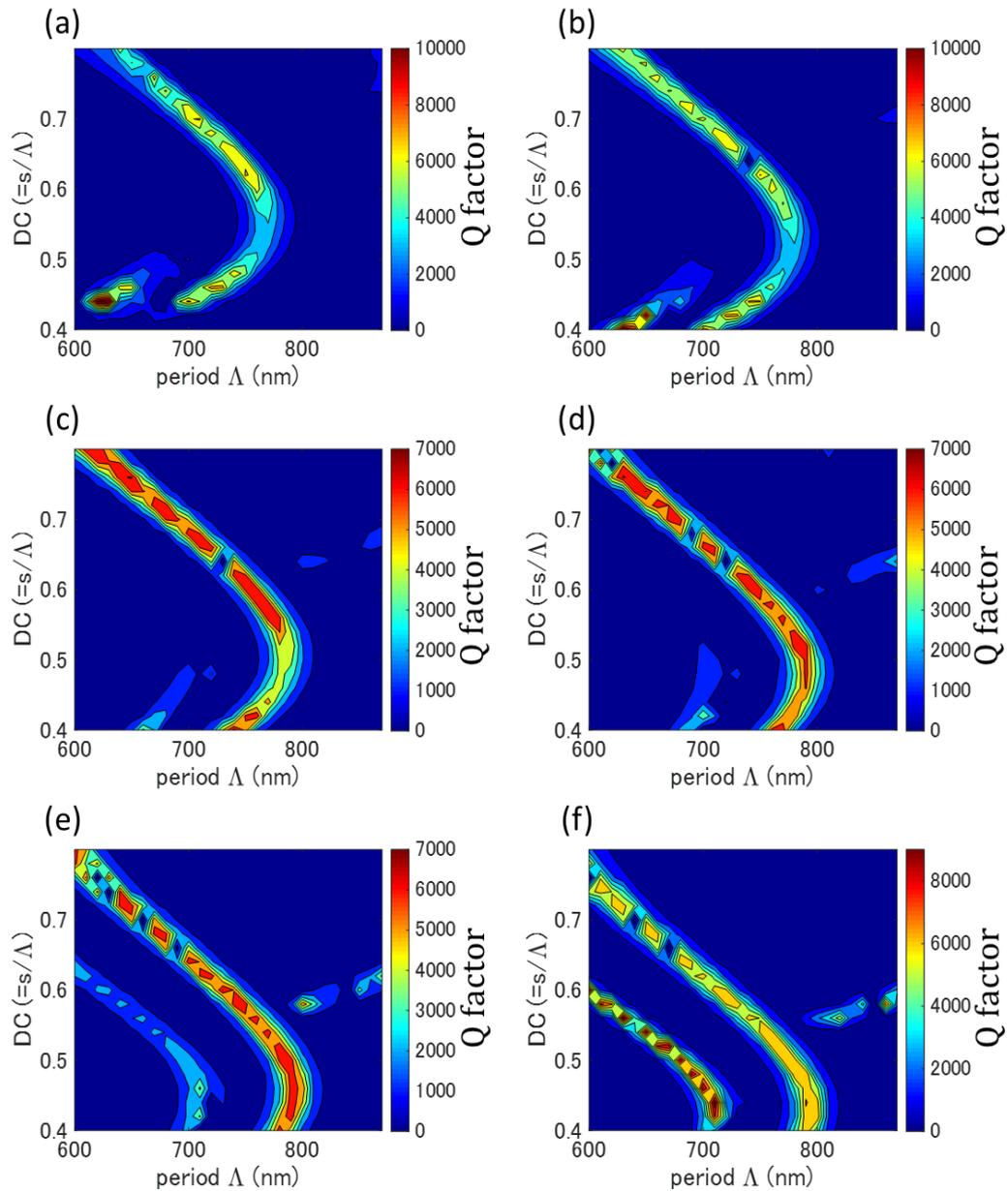


Fig. 4.3 Color map of Q factor at each angle when  $\Lambda = 600 \text{ nm} \sim 870 \text{ nm}$  with 20 nm step, and  $DC = 0.4 \sim 0.8$  with 0.02 step, (a)80°, (b)82°, (c)84°, (d)86°, (e)88°, (f)90°.

#### 4.4 変調帯域を決定する要因

変調器の変調度は前節でシミュレーションした Q 値や EO ポリマーの EO 係数によって決まる。一方で、変調速度を向上するための手法を考える。金属と異なり、Si と EO ポリマーを用いていることにより生じる Fig. 4.4 のような抵抗とキャパシタンスに由来すると考えられる。ここで生じる  $R$  と  $C$  及び、ここから RC 回路にならって見積もった変調帯域  $f$  は式(4.1)のように表され、デバイスの面積  $L^2$  に反比例することが分かる。

$$R_{all} = \frac{\rho L}{st_g}, C_{all} = \frac{\varepsilon_a \varepsilon_0 L t_g}{a} \quad (4.1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{sa}{2\pi \varepsilon_a \varepsilon_0 \rho L^2}$$

ただし、 $R_{all}$  及び  $C_{all}$  は全ての Si グレーティングを含めたデバイス全体の抵抗及び容量であり、 $L$  はグレーティング長、 $s$  は Si グレーティング幅、 $a$  はグレーティング間の幅、 $t_g$  はグレーティングの高さ、 $\rho$  は Si の抵抗率、 $\varepsilon_a$  は EO ポリマーの誘電率、 $\varepsilon_0$  は真空の誘電率である。さらに、定量的に評価はできていないが、測定に必要な各種ケーブルや外付けの電極パッド等にも抵抗や容量が生じていると考えられる。

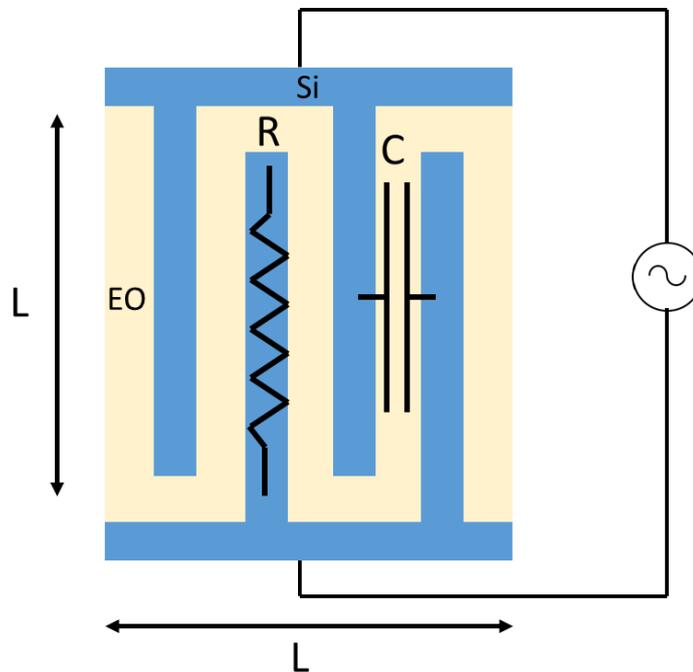


Fig. 4.4 Top view of the grating to calculate operating frequency with  $R$  and  $C$ .

## 4.5 基板へのドーピング濃度の影響

前節で変調速度について検討をしたが、変調帯域  $f$  は Si の抵抗率  $\rho$  に反比例していることが分かる。一般に Si への不純物のドーピング濃度を大きくすると、抵抗率は小さくなる。よって、高濃度のドーピングをするほうが変調帯域を大きくすることができる。一方で、高濃度のドーピングをすると、Si の吸光度が大きくなり、Si による光の吸収が無視できなくなる。その結果、吸収により共振の  $Q$  値が小さくなってしまふ。そこで、各ドーピング濃度における光の共振スペクトルを FDTD 法を用いて計算した結果を Fig. 4.5 に示す。黒線は Si による吸収がなしとしていて、屈折率の虚数部

分  $k=0$  である。赤破線、青破線、黒破線はそれぞれ P イオンを  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  でドーピングしている。黒線と赤線を比べるとほぼ同一のスペクトルを示していて、Q 値もそれぞれ 1700、1600 程度であり、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  のドーピングによる吸収の影響は小さい。しかし、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の青線では共振が少し鈍っていて、Q 値が 1000 程度である。さらに、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  の黒線では共振が大きく鈍っているため、Q 値が 150 程度まで落ち込んでいる。

一方で、抵抗率を考えると、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  でそれぞれ、 $\rho = 2.5 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}$ 、 $6.0 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ 、 $7.0 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$  となる。変調帯域  $f$  は Si の抵抗率  $\rho$  に反比例しているため、理論的には  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  に比べて、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  のドーピング濃度の時の変調帯域はそれぞれ、約 4 倍、約 35 倍に向上することが分かる。

これらの結果から、今回の研究で用いる Si 基板は P イオンを  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の濃度でドーピングすることにする。

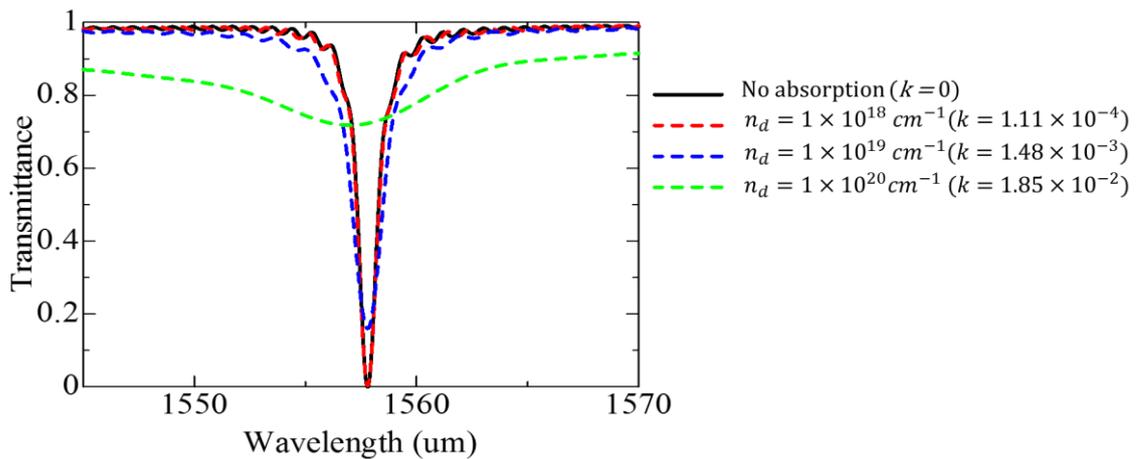


Fig. 4.5 Transmittance spectrum with various doping density (no doping,  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  of phosphorus ion).

## 4.6 ビーム幅とデバイスサイズの影響について

前々節より変調帯域は、デバイス面積に反比例して大きくなるため、デバイスサイズを小さくすることで変調速度を向上できる。ただし、デバイスサイズが小さいと Si グレーティングの数が減り、共振が弱くなる。そのため、Q 値がグレーティング数に対してどのように変化するかをシミュレーションした。Si のグレーティング数  $N$  と入射光としてガウシアンビームを用いた時のビーム幅  $w_0$  に対する Q 値の変化を Fig. 4.6 に示す。これより、グレーティング数  $N$  が 50 より大きい時、Q 値はほぼ劣化しないことが分かった。この時のデバイスサイズはおよそ  $40 \mu \text{ m}$  四方であり、ドー

ピング濃度が  $1 \times 10^{18}$  としたときの変調速度は、式(1)より 2.7 GHz と計算され、高速変調が期待できる。

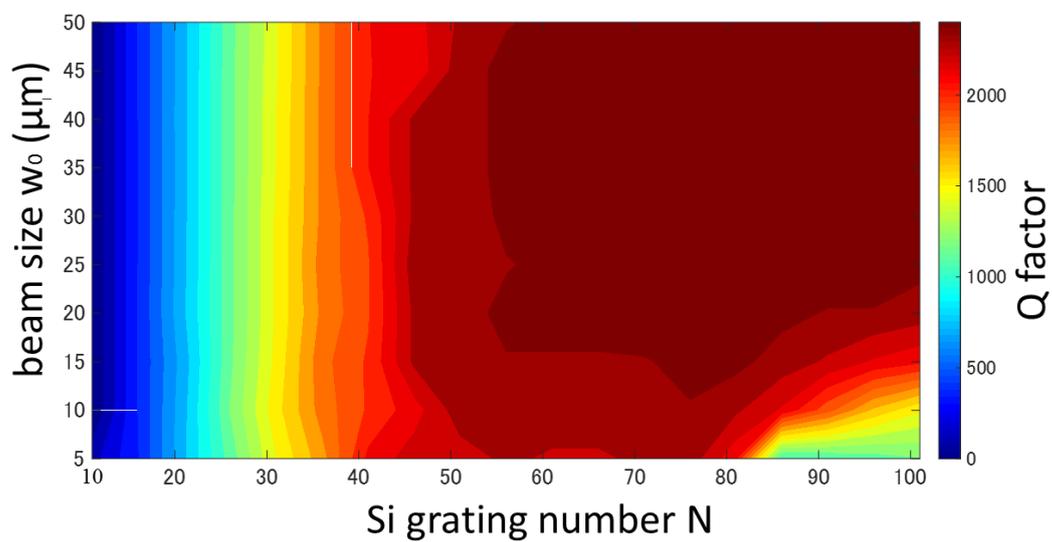


Fig. 4.6 Color map of Q-factor when Si grating number  $N = 10 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$  with 10 nm step and beam radius  $w_0 = 5 \text{ nm} \sim 50 \text{ nm}$  with 5 nm step.

## 5 光学測定系

### 5.1 従来の測定系

先行研究[39]や関連したプラズモニクスを用いた強度変調の研究[52]及び高変調度を実証するための実験において利用していた測定系を Fig. 5.1 に示す。レーザーから出た光が光ファイバを通過しファイバコリメータから自由空間に出射される。偏光板を通過した光がデバイスに入射され、その反射光または透過光が再びファイバコリメータにて集光され、光ファイバを通過し、受光装置にて測定される。

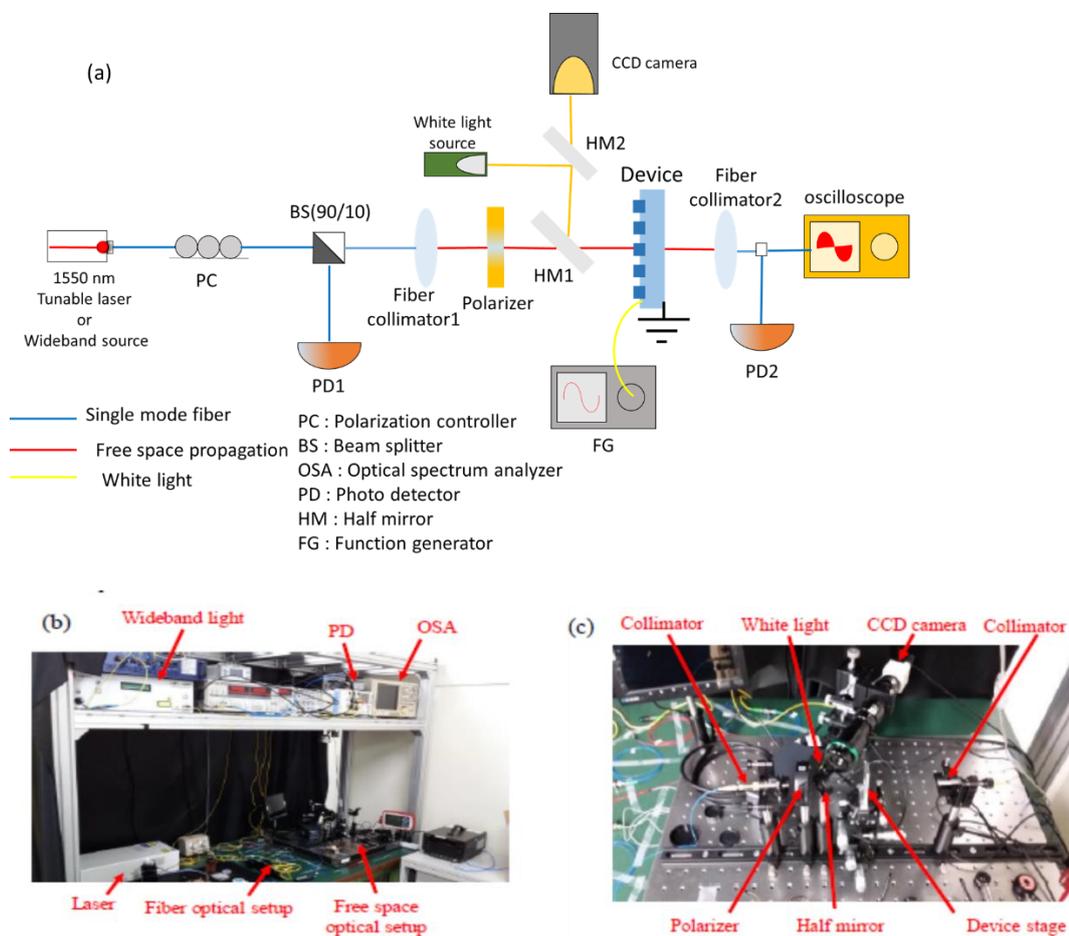
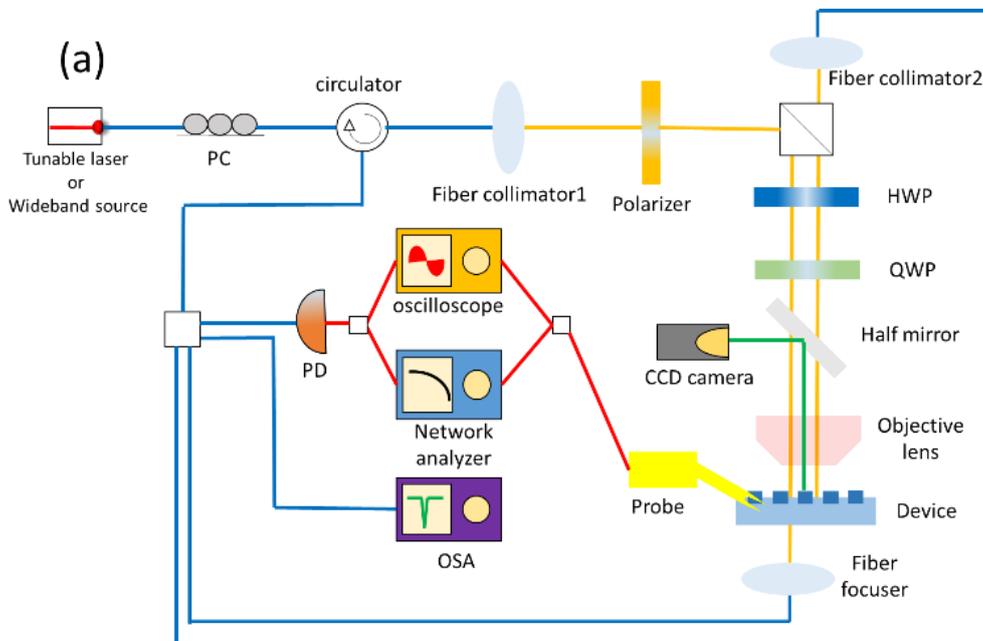


Fig. 5.1 Conventional optical measurement setup. (a)Schematic diagram, (b)Picture of overall view, (c)Picture of free space optical setup.

## 5.2 新しい測定系

今回の研究では変調器の変調帯域を向上させることが目的の一つであったので、それを可能にするための新たな測定系を実現する必要があった。変調速度向上のシミュレーションについての節において説明したように、変調帯域はデバイスサイズにより制限されるため、より面積の小さいデバイスを作製し、測定する必要がある。従来の系のビーム幅を計測したところおよそ  $100\ \mu\text{m}$  であり、これより小さなデバイスの測定を行うと、ビームがデバイスより大きくなり損失が増えてしまう。よって、よりビーム幅を絞ることができるようにするために対物レンズを用いることにした。さらに、測定系に生じる抵抗や容量を減らすために、従来のワイヤーボンディングや BNC ケーブルによる接続ではなく、サンプル上に直接 GS プロブを落とせる構造にした。これを実現するための測定系を Fig. 5.2 に示す。この測定系は関連研究である、位相変調器の測定も行えるようにするために、HWP や QWP を挿入できるようにしている。レーザーから出た光が光ファイバを通過しファイバコリメータから自由空間に出射される。偏光板を通過した光が PBS により偏波が分離される。その後、HWP を通過した光が対物レンズにより集光されデバイスに入射される。その反射光は再び同系を通り 2 つの偏波がそれぞれファイバコリメータにて集光され、一方で透過光はファイバフォーカサにて集光される。これらの光は再び光ファイバを通過し、受光装置にて測定される。



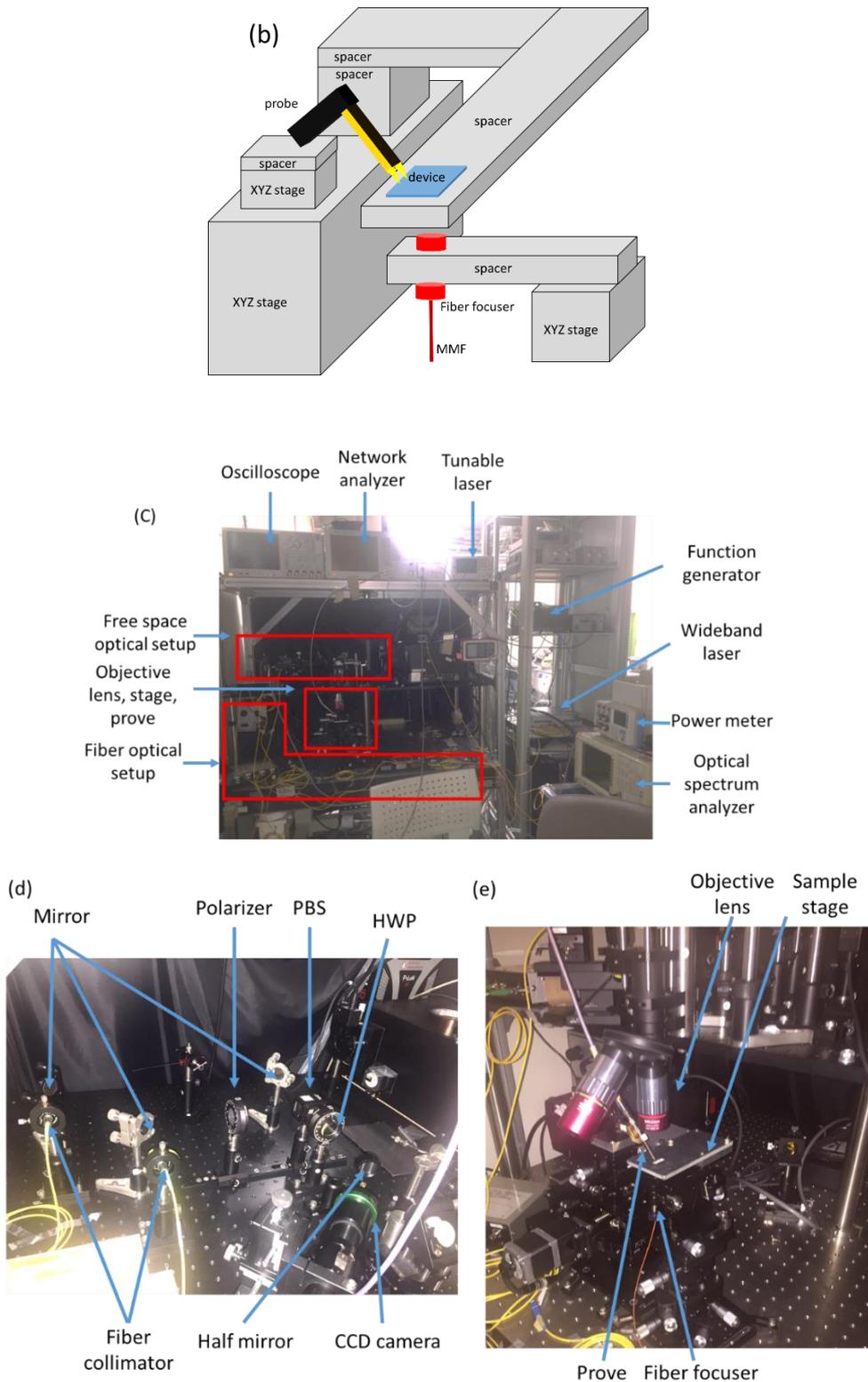


Fig. 5.2 New optical measurement setup. (a) Schematic diagram of overall setup, (b) Schematic diagram of vertical optical setup, (c) Picture of free space view, (d) Picture of vertical optical setup.

### 5.3 光源、受光装置等

光源は広波長帯域光源及び、波長可変レーザーを用いた。広波長帯域光源として、YSL Photonics の SC-5 を用いた。これは 470 nm ~ 2400 nm の超広帯域の無偏光状態の光を出射することができる。波長可変レーザーとして、santec の TSL-550 を用いた。これは 1500 nm ~ 1630 nm の範囲内の単一波長の完全偏光状態の光を出射することができる。

受光装置はフォトディテクタ及び、光スペクトルアナライザを用いた。フォトディテクタとして、Discovery 社の DSC-R402PIN を用いた。フォトディテクタは入射した光強度を電気信号に変換する装置だが、この装置は最大で 10 GHz の帯域まで応答することが可能である。光スペクトルアナライザとして、横河計測の AQ6317B を用いた。600 nm ~ 1750 nm の範囲で光強度のスペクトルを測定することができる。

交流信号を印可して変調を確認するためにファンクションジェネレータ及びオシロスコープを用いた。ファンクションジェネレータとして、エヌエフ回路設計ブロック社の WF1966 を用いた。これは最大 50MHz までの任意波形を形成することができる。またオシロスコープとして、テクトロニクス社の MDO4104C を用いた。4 つのチャンネルを持ち、最大 1 GHz の帯域で波形を表示することができる。

デバイスの変調帯域を測定するためには、ネットワークアナライザとして、KEYSIGHT 社の E5063A を用いた。100 kHz から最大で 18 GHz の範囲で回路の S パラメータを計測することができる。

デバイスの反射光や透過光の共振測定には、広波超帯域光源と光スペクトルアナライザを用いた。また、光の共振波長付近での強度変調を測定する際には、ファンクションジェネレータにて交流信号をデバイスに印可し、光源として波長可変レーザーを用いて、フォトディテクタで変調された光を受光したのちオシロスコープで波形を確認した。さらに、高周波における変調帯域の確認のためにはネットワークアナライザを用いた。

### 5.4 新しい測定系の構成手法

対物レンズにて集光された光がファイバーフォーカサにて再集光されるまでの系の構成手法について説明する。系における光線は Fig. 5.3 のように表すことができる。対物レンズは 5 倍のものと 20 倍のものがあったが、このどちらでも利用できるように設計するためには、(i) 5 倍と 20 倍で別々のフォーカサを設計し用いる、(ii) Fig. 5.3 における  $o$  が可変のフォーカサを用いる、(iii) SMF(single mode fiber)ではなく MMF(multi mode fiber)を用いる、が考えられる。そこでアライメントの簡便性を考えて(iii)を用いて、5 倍の対物レンズをメインに設計することにした。

対物レンズに入射する光は  $D = 3.6 \text{ mm}$  にコリメートされている。対物レンズの焦点距離  $f$  及び WD(Working distance)はそれぞれ  $40 \text{ mm}$ 、 $37 \text{ mm}$  である。対物レンズが WD の位置で集光されているときのビーム幅  $SD$  は、式 5.1 にて表される。NA は対物レンズの開口数(Numerical aperture)である。

$$SD = \frac{2 \times 0.61 \times \lambda}{NA} \quad (5.1)$$

ここで、NA は  $n$  を媒質の屈折率（この場合は空気の 1）として以下に表される。

$$NA = n \times \sin(\theta) \sim \frac{D}{2f} \quad (5.2)$$

以上より、 $D = 3.6 \text{ mm}$ 、 $f = 40 \text{ mm}$  を代入すると、 $SD = 42.0 \text{ }\mu\text{m}$  となる。さらに、レンズの式を考えると、以下の式 5.3 が成立する。

$$\frac{1}{i} + \frac{1}{o} = \frac{1}{f}, M = \frac{i}{o}, SD = M \times a \quad (5.3)$$

ここで、 $i$ 、 $o$  はそれぞれ対物レンズの集光点からフォーカサレンズまでの距離、フォーカサレンズから MMF までの距離であり、 $M$  は倍率、 $a$  は MMF のコア径である。これらの式を元に、フォーカサを発注する、**ozoptics** の使用できるレンズやファイバ等をまとめたデータシートから現実的に実現可能な構造を設計した。ここで、生じる問題点として、2 種類の対物レンズを用いるときのファイバとの結合損が生じる問題と、フォーカサのレンズが光をしっかりと集光するために、レンズ面におけるビーム幅がレンズのアパチャーの 1/3 程度である必要という問題である。前者は MMF を利用するために解決できる。後者は、フォーカサレンズのレンズ面でのビーム幅  $d$  は以下の式 5.4 に表される。

$$d = \frac{D \times i}{f} \quad (5.4)$$

この値がフォーカサレンズの 1/3 程度になるようにする必要がある。

接続するスペクトルアナライザ等との互換性より、MMF のコア径が  $50 \text{ }\mu\text{m}$  である必要があり、 $a = 50 \text{ }\mu\text{m}$  とする。各レンズの詳細と照らし合わせると、 $f = 8.0 \text{ mm}$  のレンズにおいて、 $i = 14.9 \text{ mm}$ 、 $o = 17.8 \text{ mm}$  と設計できる。この時、 $d = 1.34 \text{ mm}$

であるが、これは、このレンズのアパチャーが  $8.6 \text{ mm}$  であるため、条件を満たす。このような値を持つフォーカサを用いることにした。

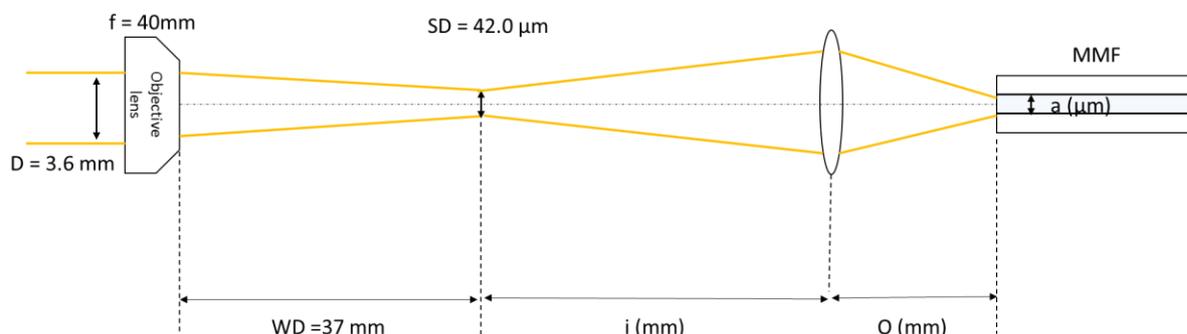


Fig. 5.3 Schematic image of beam from objective lens to fiber focuser.

## 5.5 新たなフォトマスクの設計

高速変調を可能にするデバイスを測定するためには、チップ上に直接 GS プローブを落とすことのできる新たなマスクパターンの設計が必要であったので説明する。まず、Fig. 5.4 に、先行研究者が作製し、従来使用していたフォトマスクのパターンを示す。中心の緑色のところにグレーティング構造が計 6 個並び、それを挟むようにして電極が配置されている。電極とプリント基板をワイヤーボンディングにより接続し、プリント基板に BNC ケーブルが接続できる端子を付けることで、電圧の印可を可能にした。この構造ではワイヤーボンディングや BNC ケーブルを用いることにより抵抗や容量が生まれるため、より高速な測定をするために直接 GS プローブを落とすことができるようにするために、プローブ間隔にあった電極配置にすることを考えた。さらに、従来のマスクでは、一度にポーリングすることのできるデバイスは、ポーリングを行うセットアップの関係で、チップ一枚につき一つに限られる。よって、新しいマスクでは一度に複数個のデバイスを同時にポーリングできるようにした。新たに設計したマスクを Fig. 1.5 に示す。Fig. 5.5 のように幅  $150 \mu\text{m}$  の電極が  $200 \mu\text{m}$  の間隔で櫛歯上に並んでいて、直接 GS プローブを落とせるようになっている。電極の幅と間隔は、当研究室が保有していた GS プローブの間隔が  $350 \mu\text{m}$  および、 $400 \mu\text{m}$  であることより決定した。さらに、その櫛歯電極は上下の大きな電極パッドにつながっていて、そこからポーリング電界をかけることにより、存在する 26 個のすべてのデバイスにポーリングを行うことができる。また、高速変調を測定するためには、各デバイスが電氣的につながっているのは不利である。そのために、ポーリングを終えたデバイスを Fig. 5.5 の赤い破線のところでダイヤモンドペンにより、切り離すことで、各デバイスを個別化でき、高速変調を測定することができる。

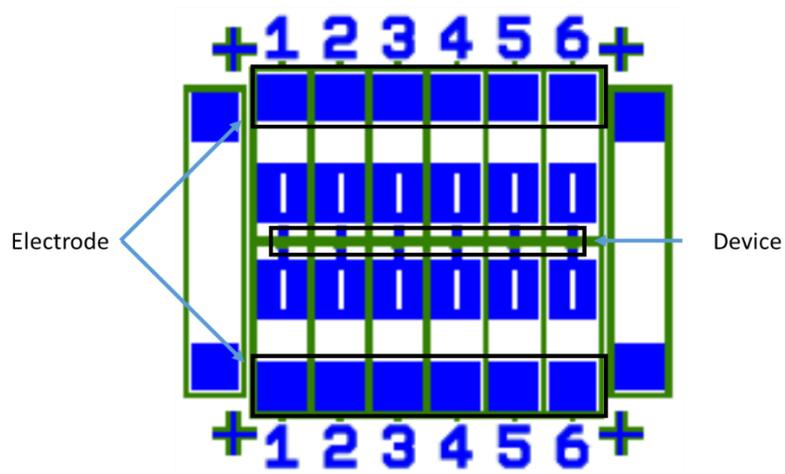


Fig. 5.4 Conventional mask.

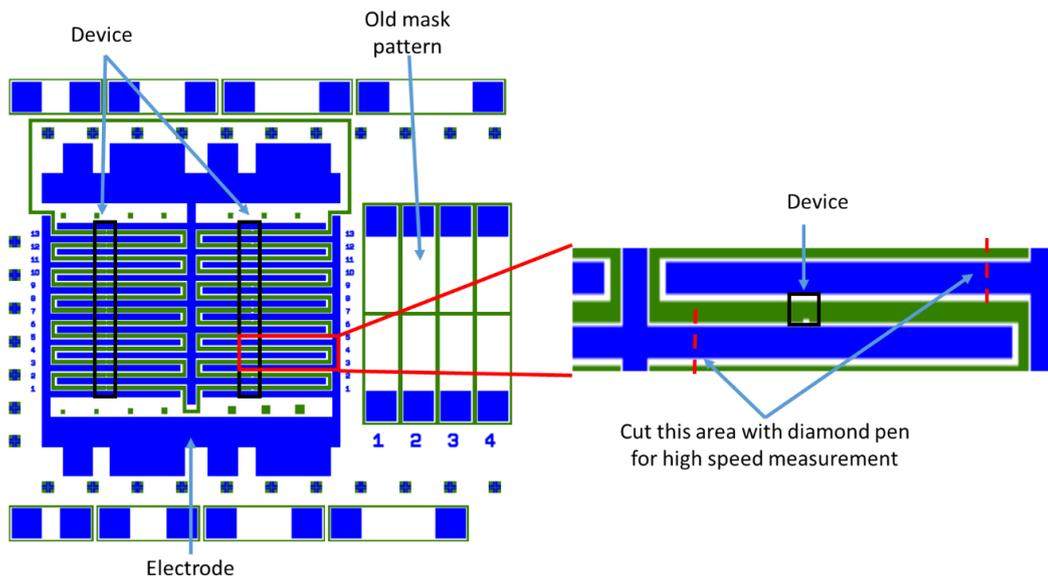


Fig. 5.5 New mask.

## 6 プロセス

### 6.1 プロセスフロー

本研究において強度変調器を試作したためそのプロセスフローを Fig. 6.1 に示す。以下において各プロセスについて詳細な条件等を記す。従来のマスクを用いた時は①～⑬のプロセスを用い、新しいマスクを使用したときは①～⑫のプロセスを用いた。

#### ① SOQ 基板

SOQ 基板は信越化学工業株式会社より提供いただいたものを用いた。クオーツ層の厚みは 625  $\mu\text{m}$  であり、Si 層の厚みは 570 nm である。また、Si 層に不純物イオンを注入することで、Si 層の電気伝導度を向上させてグレーティング内で電極として用いられるようにした。P イオンを  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  の各濃度で注入し、その後アニーリングすることで n-Si とした。アニーリングは窒素雰囲気下で 900  $^{\circ}\text{C}$  にて 30 分間行った。これはケイ・エス・ティ・ワールド株式会社に外注することで行った。

#### ② Cr スパッタリング

武田 CR の芝浦 CFS-4EP-LL を用いて、グレーティングパターン用のマスクとしての Cr を約 300 nm スパッタリングした。詳細条件は Table 6.1 の通り。

Table 6.1 Condition of Cr sputtering.

Gas	Ar	Rotation speed	20.0 rpm
Flow rate	23.0 sccm	Sputter time	2100.0 sec
Power	200 W		

#### ③ グレーティングパターンの EB リソグラフィ

まずレジストとして ZEP520A7 をスピンコートした。詳細条件は Table 6.2 の通り。次に武田 CR の ADVANTEST F7000-VD02 を用いて電子線描画を行った。描画の際の電子の Dose 量は  $104 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  である。最後に現像液 ZED-N50 を用いて約 50 秒間かけてパターンの現像を行った。

Table 6.2 Condition of ZEP520A7 spincoating.

	Rotation speed (rpm)	Time (sec)	Bake temp. (°C)	Bake time (sec)
OAP	3000	30	110	60
ZEP520A7	6000	60	180	300

## ④ Cr のドライエッチング

武田 CR の ULVAC CE-S を用いて、レジストをマスクとして Cr をドライエッチングした。詳細条件は Table 6.3 の通り。

Table 6.3 Condition of Cr dry etching.

Gas 1, flow rate	Cl <sub>2</sub> , 40.0 sccm	RFA	400 W
Gas 2, flow rate	O <sub>2</sub> , 25.0 sccm	RFB	20 W
Gas 3, flow rate	Ar, 10.0 sccm	time	180 sec
APC press.	5.0 Pa		

## ⑤ Si のドライエッチング

武田 CR の ULVAC CE-S を用いて、Cr をマスクとして Si をドライエッチングした。詳細条件は Table 6.4 の通り。詳しい条件出しについては後の節で説明する。

Table 6.4 Condition of Si dry etching.

Gas 1, flow rate	CF <sub>4</sub> , 60.0 sccm	RFA	200 W
Gas 2, flow rate	O <sub>2</sub> , 5.0 sccm	RFB	200 W
APC press.	0.9 Pa	time	300 sec

## ⑥ Cr のウェットエッチング

Cr エッチング液を用いてマスクの Cr をウェットエッチングした。この溶液はグレーティングの Si と反応しないため、確実に Cr を除去するために約 20 分間行った。

## ⑦ 電極パターンのフォトリソグラフィ

まずレジストとして AZ5200NJ をスピコートした。次に CR132 のマスクアライナーを用いてフォトリソグラフィを行った。まず 2 秒間の照射ののち、反転ベークを行い、最後に全体照射を 10 秒間行った。最後に現像液 TMAH を用いて約 50 秒間かけてパターンの現像を行った。詳細条件は Table 6.5 の通り。

Table 6.5 Condition of photolithography.

	Rotation speed (rpm)	Time (sec)	Bake temp. (°C)	Bake time (sec)
AZ5200NJ	3000	60	90	60
反転バーク	—	—	120	120

## ⑧ Cr の EB 蒸着

CR132 の ULVAC の EB 蒸着機を用いて電極の Cr を約 150 nm の厚さで EB 蒸着した。電極として Cr をもちいた理由は、先行研究にあるように Si と Cr の接合がオーミック接合であり接触抵抗が小さいこと及び、後述のアセトンを付けた綿棒による EO ポリマー除去の際に Cr 電極がはがれにくいことが挙げられる [39]。

## ⑨ リフトオフ

アセトンを用いて電極パターンを構成するためにリフトオフを行った。まず、サンプルをスライドガラスに固定し、アセトンの入ったビーカー内で 5 分間静置した。その後スポイトを使い空気をパターンに送ることで大まかに Cr を除去した。最後に超音波洗浄機を 1 分間用いることで細かいパターン内の Cr を除去した。

## ⑩ EO ポリマーのスピンコーティング

共同研究先の NICT から提供いただいた粉末状の EO ポリマーを有機溶媒であるシクロヘキサノンに 20 wt% の重量濃度で溶かし、3 時間以上の攪拌およびろ過により EO ポリマー溶液を作製した。作製した溶液状の EO ポリマーをスピンコーティングするが、この回転速度と時間により EO ポリマーの膜厚が変化する。今回は Table 6.6 に示す条件でスピコートを行った。その後、有機溶媒を除去するためにバークをホットプレートと真空乾燥器を用いて行った。その詳細条件は Table 6.7 の通り。また、このスピコートのレートにおける EO ポリマーの厚みを段差系で測定するとおよそ 1.5  $\mu\text{m}$  ほどである。

Table 6.6 Condition of EO polymer spincoating.

	Rotation speed (rpm)	Time (sec)
EO polymer	2000	30

Table 6.7 Condition of EO polymer baking.

	Bake temp. (°C)	Bake time (sec)	condition
Hot plate	140	60	In cleanroom
Vacuum bake	100	60	In vacuum

#### ⑪ EO ポリマーの除去

EO ポリマーはスピンコーティングにより全面に塗布されるため、電極を露出させるために、アセトンを綿棒につけ電極パターン上をこすることでその部分のアセトンを除去した。サンプルを割ってしまう危険性があるので慎重に行った。今後の改善案として、グレーティング内の EO ポリマーに悪影響を与えない形で電極上の EO ポリマーを除去できる手法を考える必要がある。

#### ⑫ ポーリング

今回用いた EO ポリマーのガラス転移温度が 132.5 °C であるため、この温度付近の 128 °C までヒーターで温度を上昇させた。この温度を保ったまま、ポーリング電界を 5 分間印可し、その後急速に冷却することでポーリングを行った。これにより EO ポリマー内の EO 色素が配向し、ポッケルス効果を発現することになる。ポーリングについての具体的な情報や条件出しは後の節で詳しく説明する。

#### ⑬ ワイヤーボンディング

従来マスクを使用した際には、チップ上の Cr 電極とプリント基板を接続するためにワイヤーボンディングの必要がある。武田 CR の WestBond 7476D を用いて、アルミ線のワイヤーによりワイヤーボンディングを行った。また新しいマスクではチップ上の電極に直接プローブを落として電圧印可が可能のためワイヤーボンディングの必要がない。

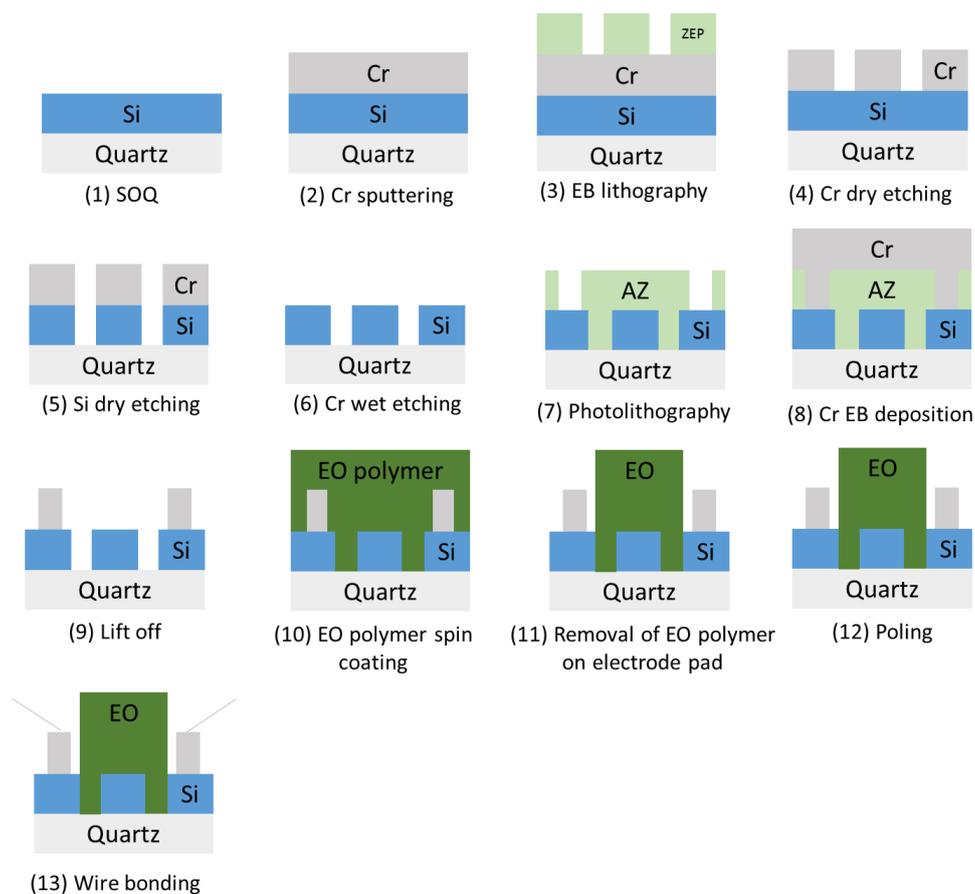


Fig. 6.1 Fabrication process flow.

## 6.2 Si のドライエッチングの条件出し

Si のドライエッチングには ICP-RIE(誘導結合型反応性イオンエッチング、Inductive Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)を用いた。RIE とはドライエッチングの一種であり、反応室内のエッチングガスに電磁波などを与えてプラズマ化し、それと同時に試料を置いている陰極に高周波電界を印可する。試料とプラズマ間に自己バイアス電位が生じ、プラズマ中のイオン種やラジカル種が試料方向に加速される。通常のドライエッチングとは異なり、RIE は異方性エッチングが可能なのが特徴の一つである。プラズマの発生方法により CCP-RIE(Capacitive Coupled Plasma-RIE、容量結合型 RIE)、ICP-RIE、ECR-RIE(Electron Cyclotron Resonance-RIE)がある。その中でも ICP-RIE では低圧力でプラズマを形成し、深くまで微細加工が可能であるという特徴を持ち、さらにプラズマを形成するアンテナ電力及び、カソード電極とプラズマ間の電位差を形成するバイアス電力の二つの電力を独立に制御可能であるため、よりエッチング形状を操作しやすいという特徴がある。その中の条件において、チャンバー圧力  $P$  が低いほど、ガス分子の平均自由行程が長くなり、より深くまでエッチングが可能であり、異方性エッチングに寄与する。また、アンテナ電力と

バイアス電力はそれぞれラジカル種とイオン種のエッチングに影響を与えるが、電氣的に中性のラジカルは、バイアス電圧に反応せず等方的なエッチングに寄与し、電荷をもつイオンは、異方性エッチングに寄与する。よって、異方性エッチングを加速させる。その結果、アンテナ電力(RFA)とバイアス電力(RFB)の比 $\alpha$ (アンテナ電力/バイアス電力)が小さいほど異方性エッチングが支配的になる[53]。よって、 $P$ と $\alpha$ を変化させて、より垂直なエッチング形状が形成できるように条件出しを行った。

まず、 $P$ を変化させた際のエッチング形状の変化を観察した。Fig. 6.2 にその時の3次元SEMによる観察結果を示す。(a)は $P=5\text{ Pa}$ であり、(b)は $P=1.5\text{ Pa}$ である。その他の条件はRFA=400 W、RFB=140 Wで $\alpha=2.86$ である。 $P=1.5\text{ Pa}$ の時のエッチングの角度はおよそ $84^\circ$ であり、 $P=5.0\text{ Pa}$ の時のグレーティングの角度はおよそ $80^\circ$ である。この結果から低圧のほうがエッチングの垂直性が向上していることが分かる。なお、(b)におけるSiグレーティングはCrのウェットエッチング前のものであり、上部にはCrのマスクがついている。

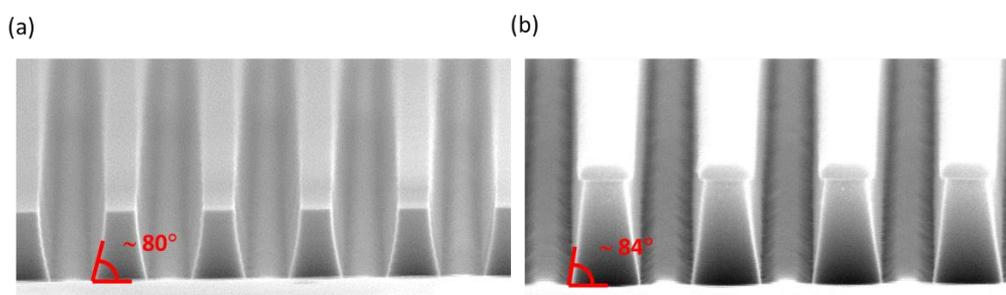


Fig. 6.2 3D SEM image of Si grating with different chamber pressure. (a) $P=5.0\text{ Pa}$ , (b) $P=1.5\text{ Pa}$ .

次に、 $\alpha$ を変化させた際のエッチング形状の変化を観察した。Fig. 6.3 にその時の3次元SEMによる観察結果を示す。全て $P=0.9\text{ Pa}$ のチャンバー圧力下で行った。 $\alpha$ の条件は(a)~(d)でそれぞれ、(a)  $\alpha=1.17$  (RFA=350 W、RFB=300 W)、(b)  $\alpha=1.12$  (RFA=280 W、RFB=250 W)、(c)  $\alpha=1.1$  (RFA=220 W、RFB=200 W)、(d)  $\alpha=1.0$  (RFA=200 W、RFB=200 W)となっている。そして、その時のグレーティングの角度は(a)~(d)でそれぞれ、 $80^\circ$ 、 $81^\circ$ 、 $85^\circ$ 、 $86.5^\circ$ である。確かに、 $\alpha$ の値を小さくしていったほうがエッチングの垂直性が向上するという結果が得られた。また、 $\alpha$ の下限であるが、詳細に条件出しをすることはなかったが、小さすぎると両者のマッチングが取れなくなり、装置のエラーが発生する恐れがあるため、この値を下限として条件出しを行った。

これらの結果を元に最終的には、 $P=0.9\text{ Pa}$ 、 $\alpha=1.0$  (RFA=200 W、RFB=200 W)としてデバイスを作製した。ただし、これらの条件によりデバイスを作製しても、その時の装置の状態等によってエッチングの形状やエッチング深さが少なからず変化

してしまうことがあるため、作製するデバイスごとに Cr のエッチング条件も含めて、微妙に条件を変化させてプロセスを進めていった。

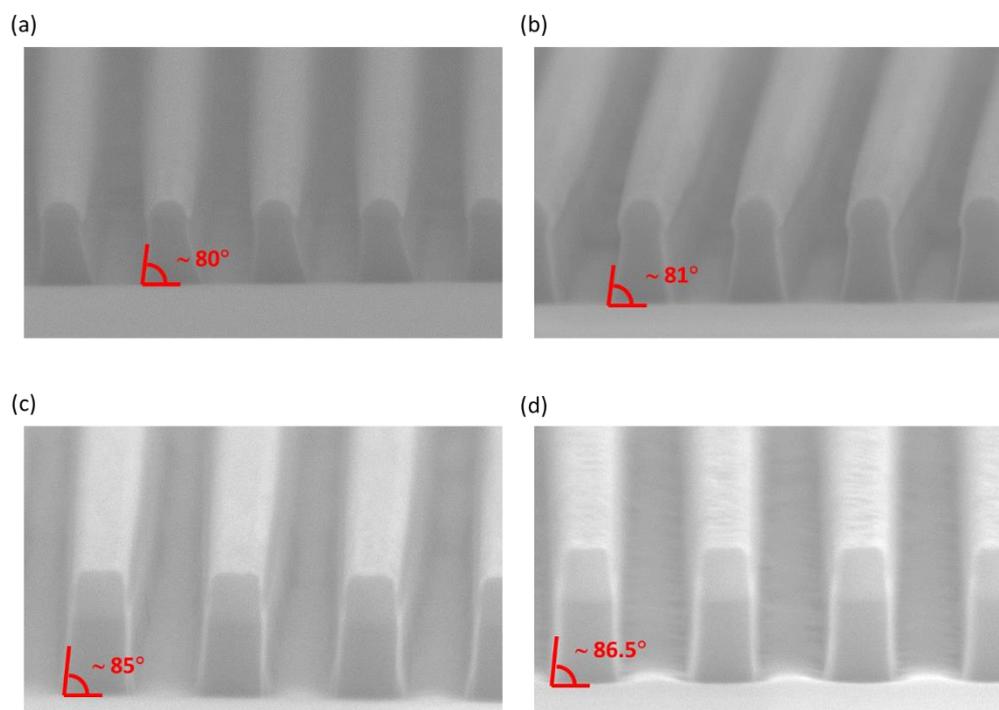
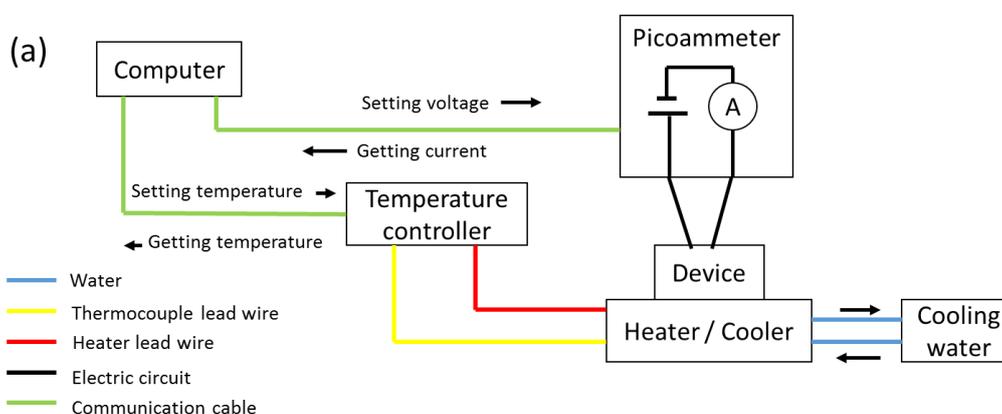


Fig. 6.3 3D SEM image of Si grating with different  $\alpha$ . (a)  $\alpha = 1.17$ , (b)  $\alpha = 1.12$ , (c)  $\alpha = 1.1$ , (d)  $\alpha = 1.0$ .

## 6.3 ポーリング

ポーリングとは、EOポリマーのガラス転移温度  $T_g$  付近の高温下において高電界をかける、高電界をかけたまま冷却することで、EOポリマーのEO色素を電界方向に配向させる処理である。先行研究から使われていたポーリングを行うためのセットアップを Fig. 6.4 に示す。LabView のプログラムにより印可電圧と温度の制御をしている。



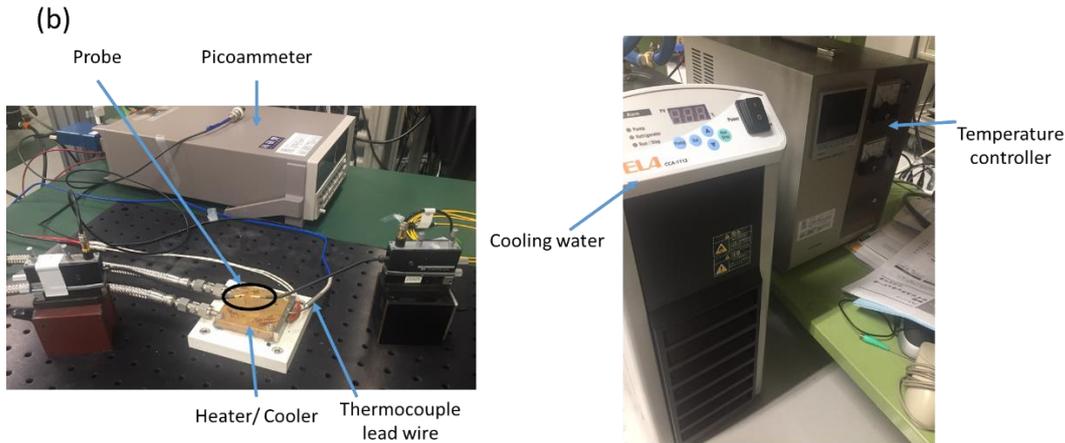


Fig. 6.4 Poling setup. (a)Schematic diagram, (b)(c)Pictures of setup.

ポーリングにおける典型的な成功例と失敗例を Fig. 6.5 に示す。(a)のように、高電圧を印可した際に、電流値に大きなブレがなく滑らかに推移している場合は、絶縁破壊等の異常が起きていなく、ポーリングに成功している可能性が高い。一方で、(b)のように高電界印可時に電流値が激しく上下に変動している場合は何かしらの異常が起きていてポーリングに失敗している場合が多く、変調電圧を加えてもデバイスが光を変調することはできない。

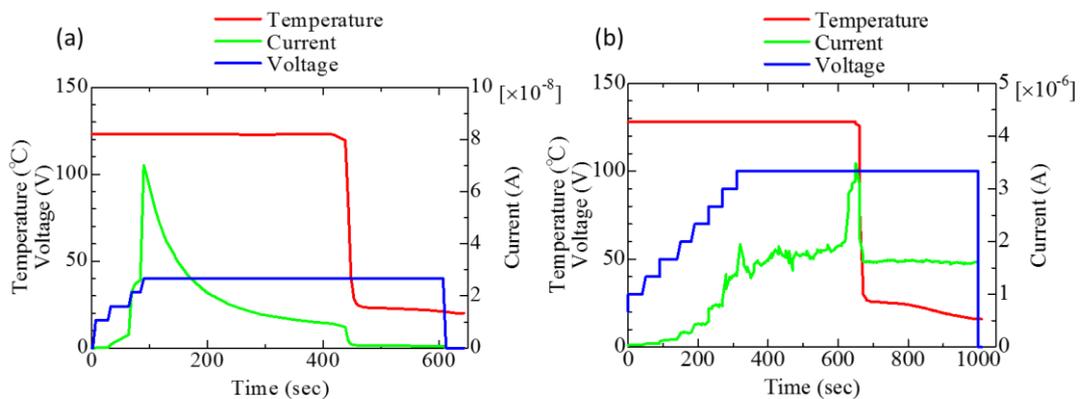


Fig. 6.5 Example of temperature, current and voltage change during poling procedure. (a)Typical successful example, (b) Typical failed example.

## 6.4 EO ポリマー及び SOQ の観察

EO ポリマーや SOQ 基板を SEM により観察しようとする時、帯電の影響によって試料に入射する電子プローブが偏向されて像が歪んだり、試料から放出されて検出器

に入射する二次電子の軌道が変わることで、不安定な異常コントラストが起きる、チャージアップという現象が生じてしまう。この時、チャージアップを防ぐためにサンプルに薄く金を蒸着して電通を良くするといった手法がとられる。今回はこの手法に  
ならい、SOQ 基板や EO ポリマーをスピコートしたサンプルの観察において、金をあらかじめサンプルにクイックコーターにて成膜した。また、グレーティング内における EO ポリマーの埋め込み具合を確認するためには、EO ポリマーを埋め込んだサンプルを劈開し、観察する必要がある。劈開はダイヤモンドペンにて直線的に傷をつけ、その傷を挟むように両方向からスライドガラスを押し付けて力を加えることで行う。この劈開の際に、EO ポリマーの端面が汚れたり、崩れたりしてしまう恐れがある。そのため、劈開の前に液体窒素に 10~20 秒ほど浸し、ポリマーを固まらせることで、崩れにくくした。これらの手法をとって観察した EO ポリマーを埋め込んだ SOQ 基板上のグレーティング構造の断面 SEM 写真を Fig. 6.6 に示す。上記の EO ポリマーのスピコーティングの条件で塗布した EO ポリマーがしっかりとグレーティング内に埋め込まれている様子が確認できる。それと同時に Si 層が一番下までエッチングされていて、クォーツ層との境界も見ることができる。

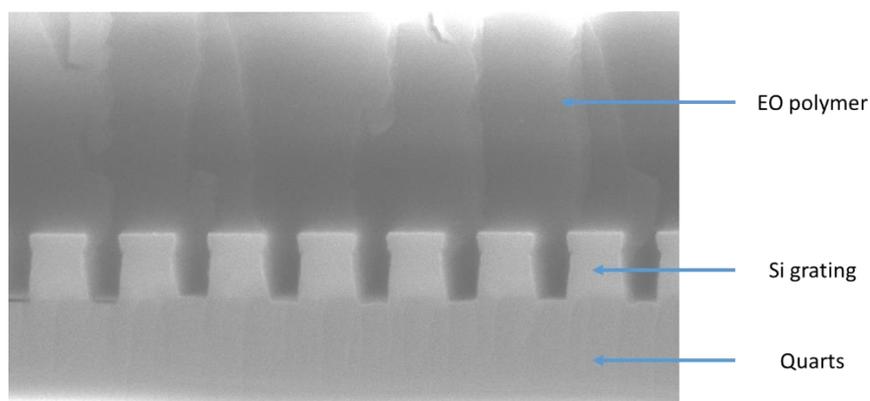


Fig. 6.6 Cross section SEM image of EO polymer embedded in Si grating on SOQ wafer.

## 7 高変調度デバイスの光学測定

### 7.1 デバイス設計値

まず変調度を改善するために4章で紹介したシミュレーション結果を元にデバイスの設計値を求めた。垂直にグレーティングが作製されていると仮定した際のシミュレーション結果から、 $s = 286 \text{ nm}$ ,  $334 \text{ nm}$ ,  $390 \text{ nm}$  をまず設計値として定めた。さらに、このデバイスを作製した時点では、Si グレーティングの垂直性に関する条件出しについてつき詰め切れておらず、 $81^\circ \sim 83^\circ$  程度の角度がついてしまうことを考慮して設計値を定めた。Fig.4.3 より、 $82^\circ$  の角度がついた際のシミュレーション結果から、周期  $\Lambda = 795 \text{ nm}$  とすると、最大の Q 値が 8000 程度、DC の変化、つまりグレーティング幅の変化に対して、およそ  $70 \text{ nm}$  の範囲で Q 値が 1000 を超える領域が得られた。よって、この範囲から、 $s = 382 \text{ nm}$ ,  $413 \text{ nm}$ ,  $477 \text{ nm}$  を設計値とした。Fig. 7.1 に  $\theta = 90^\circ$  で  $s = 334 \text{ nm}$  および、 $\theta = 83^\circ$  で  $s = 413 \text{ nm}$  における FDTD による波長スペクトルのシミュレーション結果を示す。それぞれ Q 値は 3000、1840 程度である。

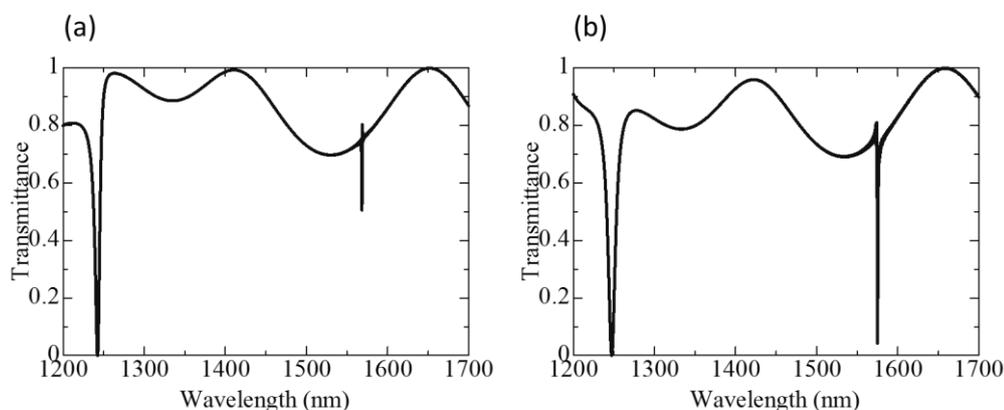


Fig. 7.1 Calculated transmittance spectrum, (a)  $\theta = 90^\circ$ ,  $\Lambda = 795 \text{ nm}$ ,  $s = 334$ , (b)  $\theta = 83^\circ$ ,  $\Lambda = 795 \text{ nm}$ ,  $s = 413$ .

### 7.2 デバイス写真

今回作製したデバイスについて、Fig. 7.2 は(a)EO ポリマーをスピコートする前の光学顕微鏡の写真、(b)グレーティングの光学顕微鏡の写真、(c)EO ポリマーをスピコートした後の光学顕微鏡の写真、および、(d)EO ポリマーをスピコートする前のグレーティング部の SEM 写真を表している。グレーティングの様子から特にごみがついていたり、壊れていたりする箇所がないため、きれいに作製できたと思われる。

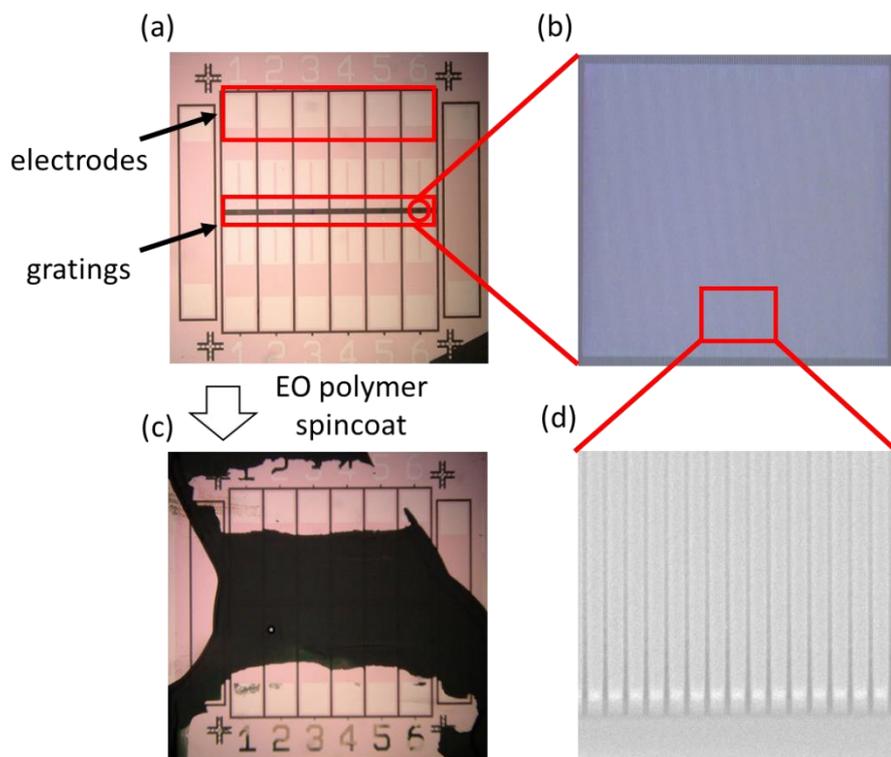


Fig. 7.2 Fabricated device. (a) Overall microscope image before EO polymer spincoating, (b) Si grating microscope image before EO polymer spincoating, (c) Overall microscope image after EO polymer spincoating, (d) 3D SEM image of Si grating before EO polymer spincoating.

### 7.3 共振測定

まず作製したデバイスの共振測定の結果を Fig. 7.3 の黒線に示す。作製した 6 個のデバイスすべてに共振が見られるのが分かる。その中でも最大の  $Q$  値を示したのは、No. 4 のデバイスであり、 $1558 \text{ nm}$  の共振波長で  $Q$  値が 1165 という値を得られた。この値は先行研究に比較しておよそ 20 倍の結果が得られている。シミュレーション結果との比較を Fig. 7.4 の赤破線に示す。シミュレーション結果と比較すると、すべてのデバイスで、Si のグレーティング幅が  $30 \text{ nm}$  小さく、角度が  $83^\circ$  である構造で、実験結果とよく一致していた。

測定結果とシミュレーション結果について、 $Q$  値と共振波長についての比較を示すと、Fig. 7.5 のようになる。共振波長、 $Q$  値については、 $s$  が一番大きな構造である、 $s = 450 \text{ nm}$  の構造を除いてよく一致している。ただ、最大の  $Q$  値が得られた構造においてもシミュレーションではより大きな 1600 以上の  $Q$  値が得られているため、作製誤差が生じていると考えられる。

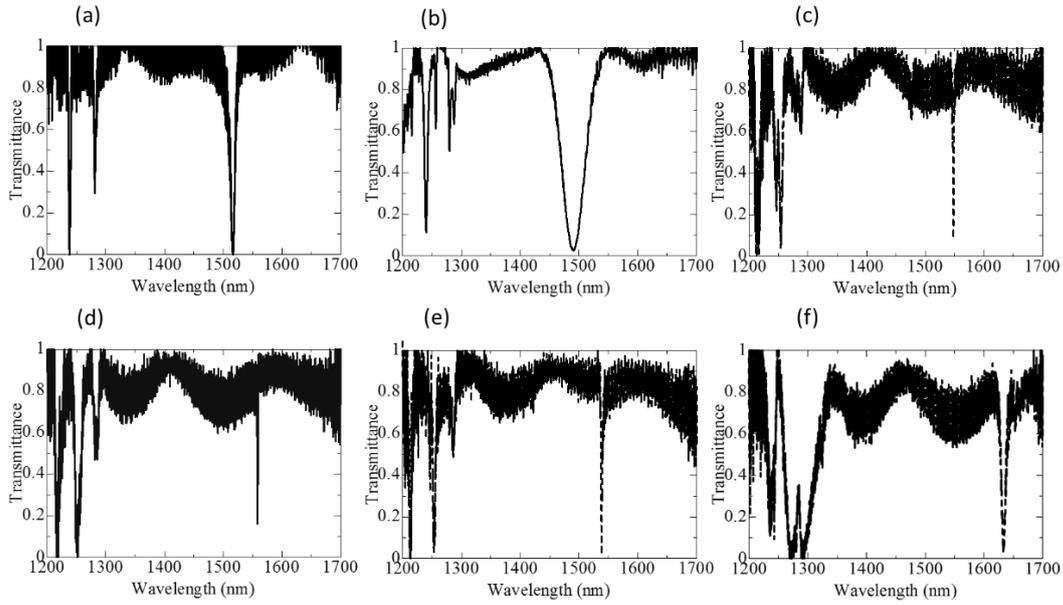


Fig. 7.3 Measured optical transmittance spectrum. The designed parameter are below. (a)  $s = 286$  nm, (b)  $s = 334$  nm, (c)  $s = 390$  nm, (d)  $s = 382$  nm, (e)  $s = 413$  nm, (f)  $s = 477$  nm.

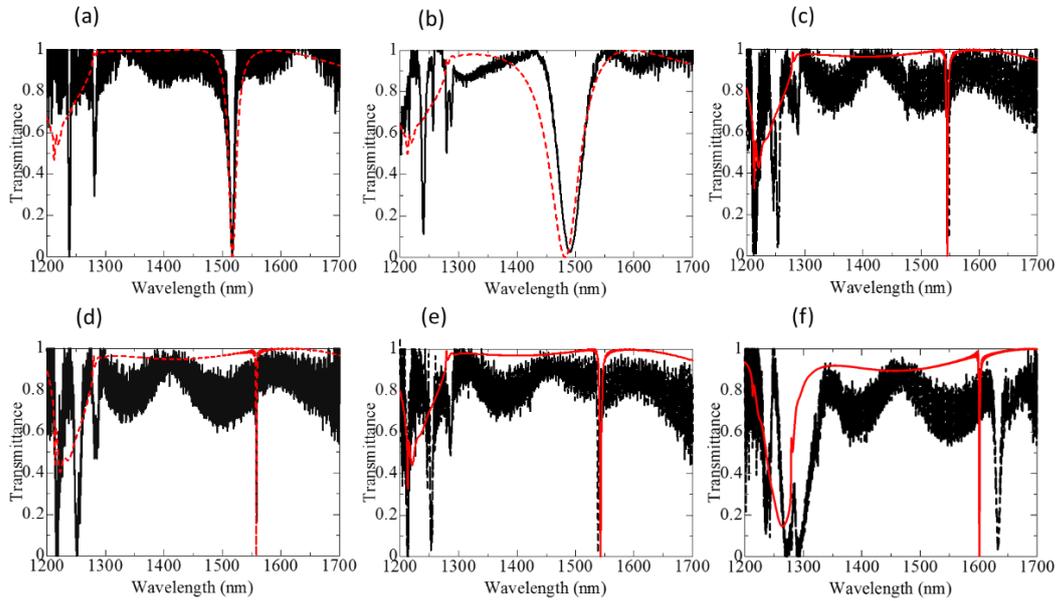


Fig. 7.4 FDTD simulated result and measured optical transmittance spectrum. We correct the Si bar width for minus 30 nm and set the angle of trapezoid to  $83^\circ$ . So the simulated result is below. (a)  $s = 256$  nm, (b)  $s = 284$  nm, (c)  $s = 360$  nm, (d)  $s = 352$  nm, (e)  $s = 383$  nm, (f)  $s = 447$  nm.

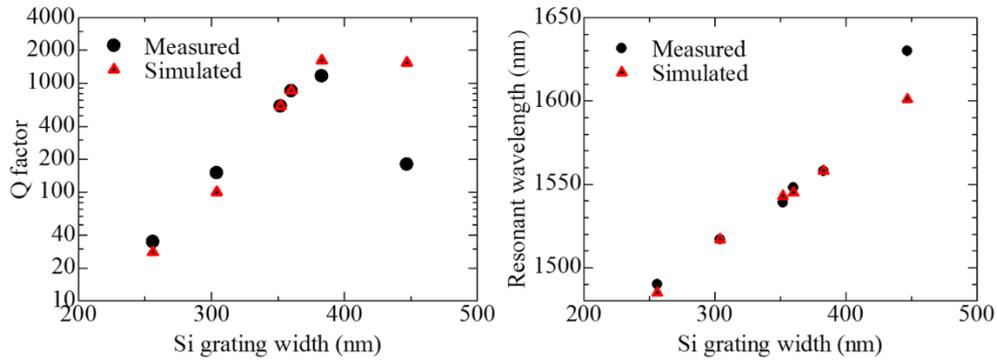


Fig. 7.5 Comparison between measured result and simulated result about (a)Q factor and (b)resonant wavelength.

## 7.4 ポーリング結果

今回のデバイス構造から、一度にポーリングを行うことのできるデバイスが一つであったので、最も Q 値の大きかった No. 4 のデバイスに対してポーリングを行った。このデバイスのポーリングは、 $T_g = 123^\circ\text{C}$  で、 $E_p = 100 \text{ V}/\mu\text{m}$  であり、およそ 40 V の電圧が印可されている。この時のポーリングの様子を Fig. 7.6 に示す。電流値の大きな変動はなく、ポーリングに成功していると考えられる。

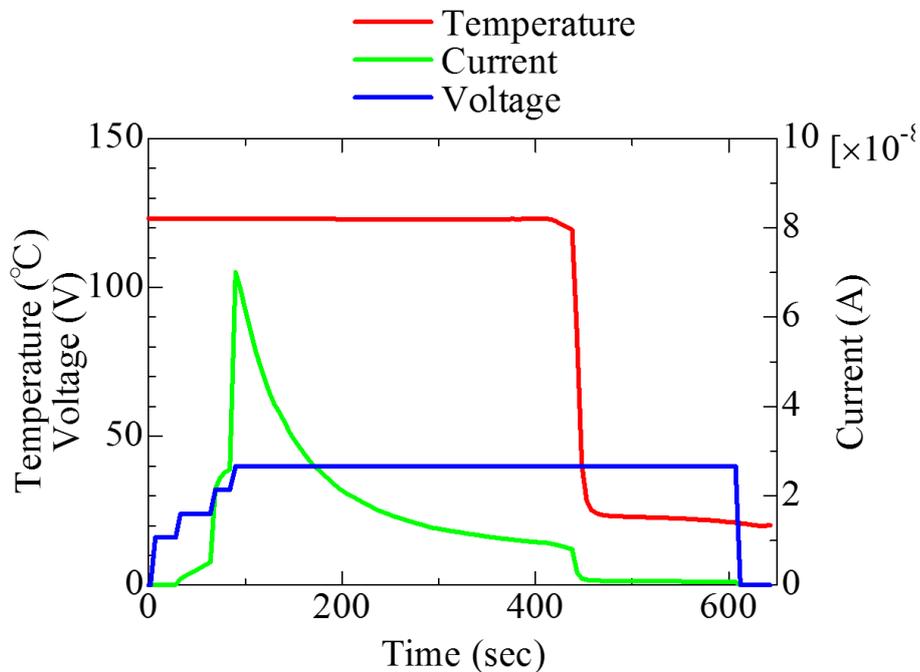


Fig. 7.6 Poling result.

## 7.5 バイアス変調測定

変調の有無の確認として、まず直流のバイアス電圧を印可した際の共振スペクトルの変化を確認した。ポーリングに成功していると、バイアス電圧を印可することによって EO ポリマーのポッケルス効果によって屈折率が変化し、共振スペクトルが変化する。今回のデバイスに対して、 $-30\text{ V}$  から  $30\text{ V}$  まで  $5\text{ V}$  刻みにバイアス電圧を印可していった際の共振スペクトルの変化を Fig. 7.7 に示す。明確なスペクトル変化を示していて、変調ができていることが確認できる。 $1559\text{ nm}$  を動作点としたとき、 $\pm 10\text{ V}$  のバイアス電圧の変化で、61%の強度変調が確認できている。Fig. 7.8 に Fig. 7.4 のシミュレーション結果に用いたものと同じ構造について、EO ポリマーの屈折率の変化量  $\Delta n_{EO}$  を  $-0.002$  から  $0.0004$  刻みで  $0.002$  まで変化させた際のシミュレーション結果を示す。共振波長がおおよそ  $1\text{ nm}$  ずれているが、同様なスペクトルの変化が得られているといえる。

次に、測定結果とシミュレーション結果を照らし合わせることで、実際のデバイス下での  $r_{33}$  を見積もってみる。屈折率変化  $\Delta n_{EO}$  と  $r_{33}$  の関係は以下の式 7.1 のようになる。

$$\Delta n_{EO} = \frac{1}{2} n_{EO}^3 r_{33} \frac{V_m}{a} = \frac{1}{6} n_{EO}^3 r_{13} \frac{V_m}{a} \quad (7.1)$$

ここで、 $V_m$  は変調電圧であり、 $a$  はグレーティング間の溝の幅である。今回は TE 光を用いたため、変調に使われる EO 定数は  $r_{13}$  となり、 $r_{13}$  は  $r_{33}$  の  $1/3$  であるため右の項のようになる。左辺と右辺からまず  $r_{13}$  を求めそれを 3 倍にしたのが  $r_{33}$  となる。シミュレーション結果と照らし合わせることで、 $V_m = 30\text{ V}$  のとき、 $\Delta n_{EO} = 0.00139$  と見積もられ、これと  $a = 410\text{ nm}$  を利用することで、 $r_{33} = 27\text{ pm/V}$  と見積もることができる。共同研究先の NICT の測定によると、 $140\text{ V}/\mu\text{m}$  の電界をかけてポーリングした結果、 $r_{33} = 89\text{ pm/V}$  となっていて、 $r_{33}$  はポーリング電界に比例することから計算すると  $r_{33}$  は  $63\text{ pm/V}$  である。今回の実験結果は理論的に計算した結果に比較して、40%程度の大きさとなっている。

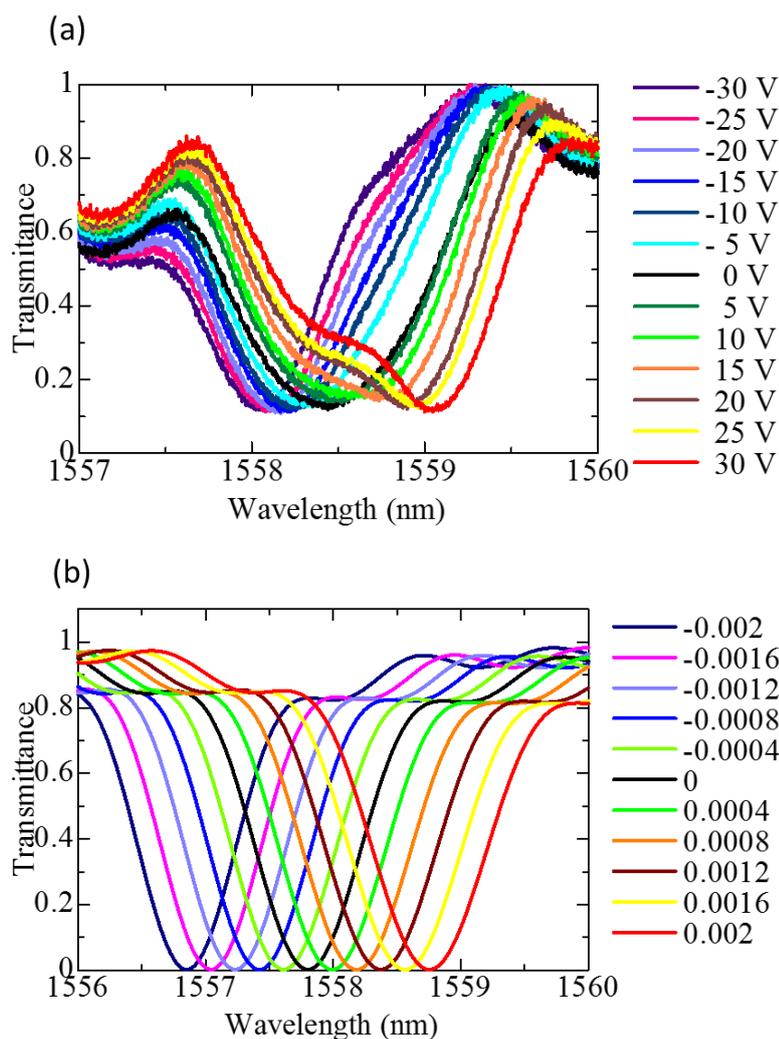


Fig. 7.7 (a) The measured transmittance spectrum under the applied voltage of  $-30$  V to  $30$  V with step of  $5$  V, (b) The simulated transmittance for various refractive index change of EO polymer from  $-0.0012$  to  $0.0012$  with step of  $0.0002$  under a condition of  $\Lambda = 795$  nm,  $s = 385$  nm,  $t_g = 570$  nm,  $\theta = 83^\circ$  obtained by FDTD simulation.

## 7.6 交流変調測定

次に交流電界を印可した際の動的な変調を行った。 $1559$  nm の波長において、 $V_{pp} = 20$  V の交流電圧による各周波数での光の変調の様子を Fig. 7.8 に示す。 $1$  kHz の周波数で最大で  $59.6\%$  の強度変調を実現できていて、DC バイアスを印可時の測定結果と一致している。この変調度の大きさは先行研究に比べておよそ  $12$  倍に向上している。また、周波数特性を Fig. 7.9 に示す。 $3$  dB 変調帯域として、 $7$  MHz の結果が得られている。今回作成したデバイスはデバイスサイズが先行研究よりも大きく、変調

速度はむしろ小さくなった。そのため、今度は変調速度を向上させるためのデバイスの作製および測定をする。

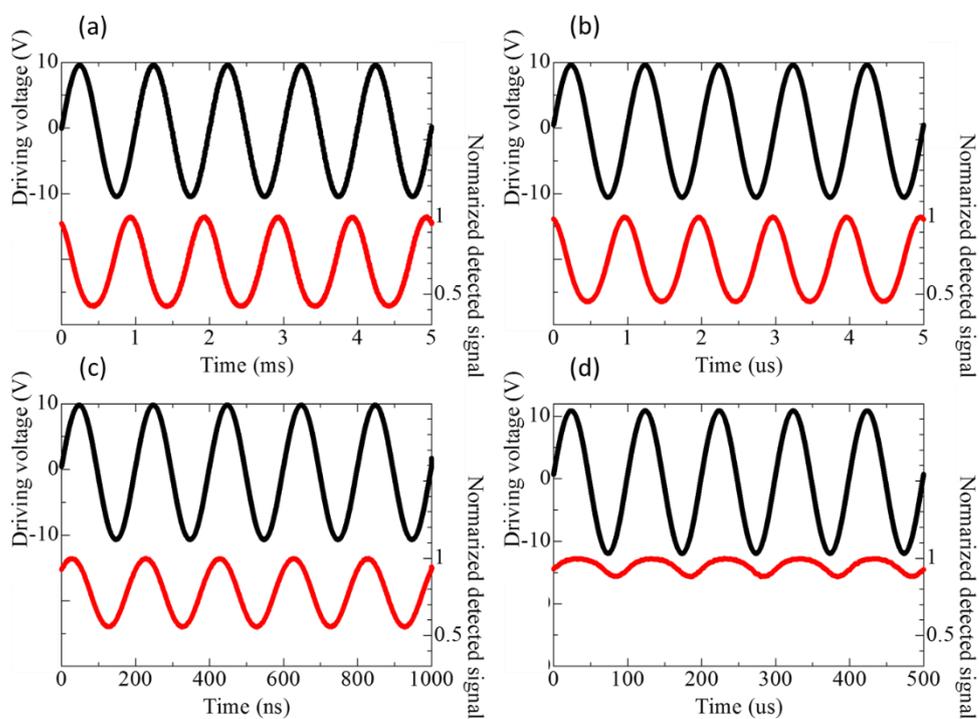


Fig. 7.8 The detected power of the transmitted light, when a 20-Vpp sinusoidal modulation signal is applied. Frequency is below. (a)1 kHz, (b)1 MHz, (c)5 MHz, (d)10 MHz.

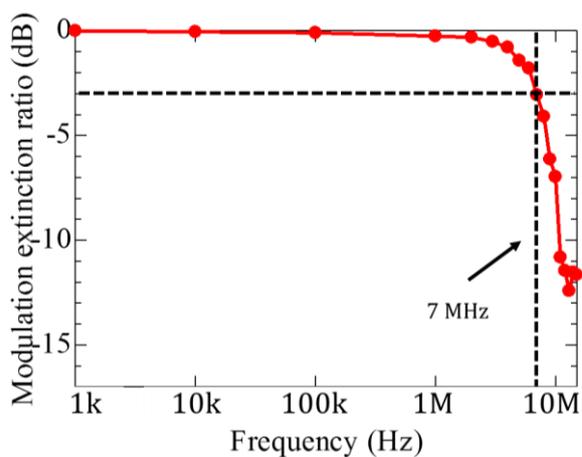


Fig. 7.9 Frequency response of the device, and 3 dB modulation bandwidth is around 7 MHz.

## 8 高速変調デバイスの光学測定

### 8.1 デバイス設計値

前章の結果により、先行研究に比べて  $Q$  値の大幅の改善及び、変調度の大幅な改善に成功した。ただし、 $Q$  値や変調度の改善を主目的としていたため、デバイスサイズを先行研究よりも大きく設計していて、変調速度の観点ではまだ改善が果たせていない。よって、本章では変調速度を改善するために作製したデバイスについての光学測定の結果について述べる。つまり、前章までの結果と合わせて、高変調度かつ高速変調可能なデバイスの作製を目標にした。

デバイスの周期  $\Lambda$  とグレーティング幅  $s$  についてはシミュレーションの節のカラーマップを参考にして、高  $Q$  値のエリア内にある、 $\Lambda = 780$  nm とした。また、 $s = 260$  nm, 280 nm, ... 480 nm, 500 nm を設計値とした。Fig. 8.1 に  $\Lambda = 780$  nm、 $s = 350$  nm の時の共振スペクトルを示す。また、グレーティング数  $N$  は 50 と 100 とし、計 26 個のデバイスを 1 サンプルに設計した。今回のデバイス作製ではドーピング濃度として、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  を用い、デバイスサイズとして、グレーティング数  $N$  は 50 と 100 を用いたため、グレーティングの周期や幅は別として、計 4 パターンの変調速度が異なると期待されるデバイスを作製した。しかし、実際に良い共振や変調を確認できたのは、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の基板で作った、 $N = 100$  のデバイスのみであった。この理由については付録の A、B で述べているため参照されたい。したがって、次章以降のデバイスやその測定結果は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の基板で作った、 $N = 100$  のデバイスのものである。

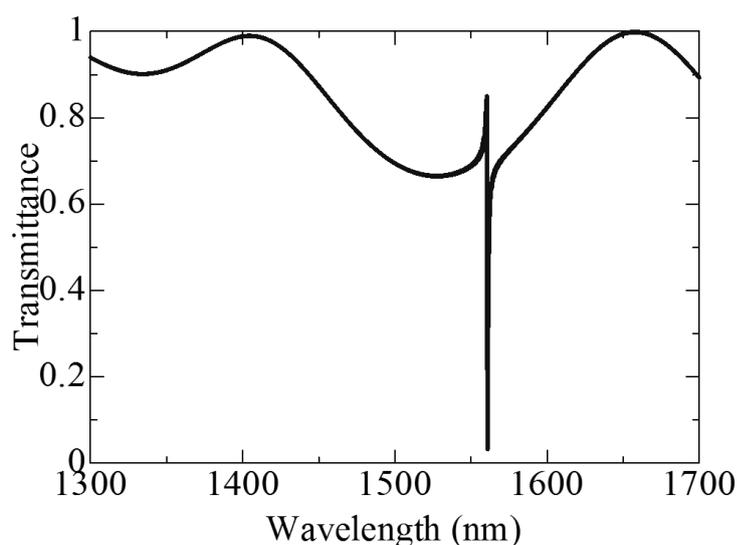


Fig. 8.1 FDTD simulated transmittance spectrum under the condition that  $\Lambda = 780$  nm、 $s = 350$  nm.

## 8.2 デバイス写真

今回作製したデバイスについて、Fig 8.2にEOポリマーをスピコートする前の光学顕微鏡の写真と、同じSOQ基板で同じプロセスにより作製したダミーデバイスのSEM写真を示す。さらに、EOポリマーをスピコートした後の写真をFig. 8.3に示す。SEMは金をクイックコートして観察している。

ほぼ垂直なグレーティングが実現できていて、EOポリマーも内部までしっかりと埋め込まれている様子を見ることができる。

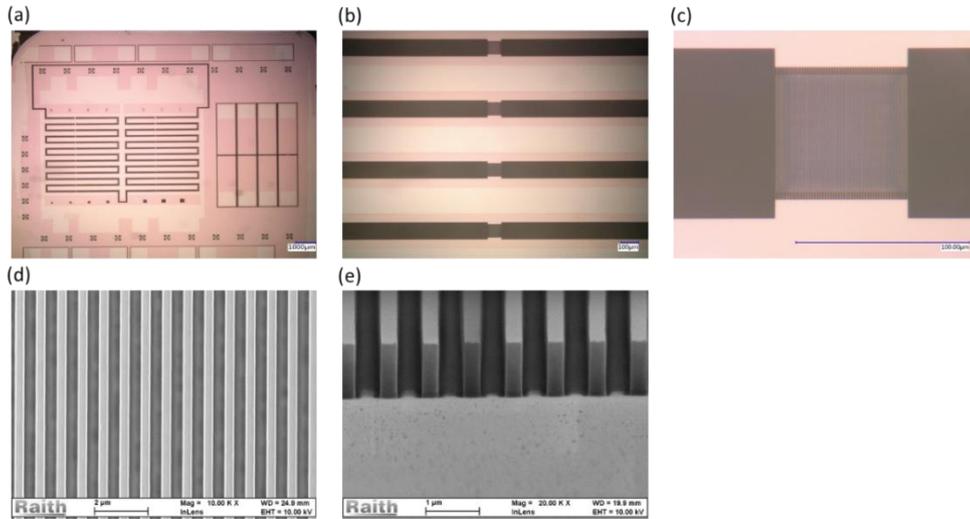


Fig. 8.2 Fabricated device image before EO polymer spincorting. (a~c)Microscope image. (a)Overall image, (b)Magnified image, (c)Grating image. (d,e)SEM image. (d)Top view of Si grating, (e)3D SEM Si grating image.

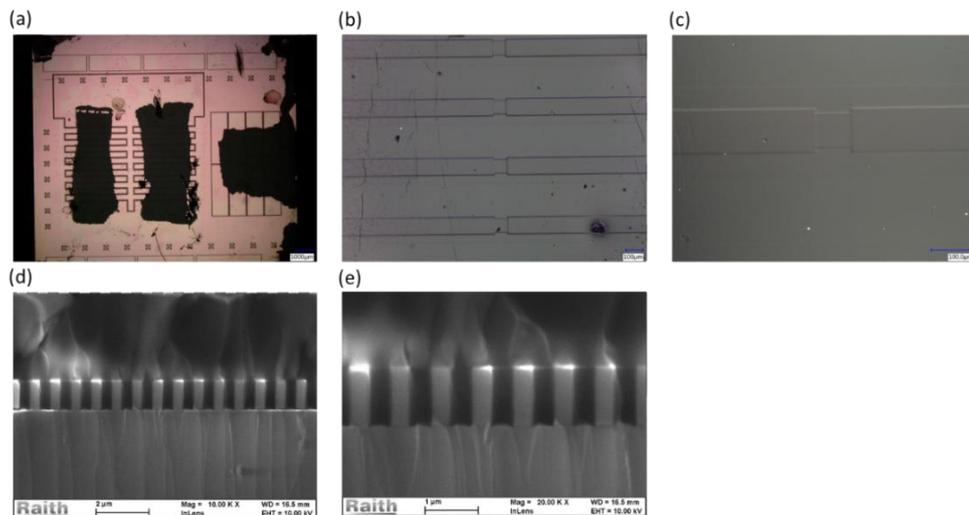


Fig. 8.3 Fabricated device image after EO polymer spincorting. (a~c)Microscope image. (a)Overall image, (b)Magnified image, (c)Grating image. (d,e)SEM image. (d)3D SEM Si grating, (e)Magnified 3D SEM Si grating image.

### 8.3 ポーリング結果

今回新しく作ったマスクを用いて、デバイスを作製したため、すべてのデバイスに対してポーリングを行うことができる。ただし、ポーリング時ではすべてのデバイスが電気的につながっているため、グレーティングに汚れがあったり、破損があったりすると、ポーリング時にショートしてしまう。よって、事前に顕微鏡によりグレーティングの状態を観察して、不備があるデバイスを切り離しておく必要がある。Fig. 8.4(a)にデバイスを分離することでショートしなかった時の IV 測定の結果を示す。

事前の IV 測定でショートせずに測定ができた後にポーリングを行う。このデバイスのポーリングは、 $T_g = 128\text{ }^\circ\text{C}$  で、60 V の電圧をかけた。その結果各デバイスに  $115 \sim 214\text{ V}/\mu\text{m}$  の範囲内のポーリング電界が印可されている。この時のポーリングの様子を Fig. 8.4(b)に示す。温度を急激に下げるときに操作の不備があつて、温度が急激に変化してしまっているが、電流値の大きな変動はなく、ポーリングに成功していると考えられる。

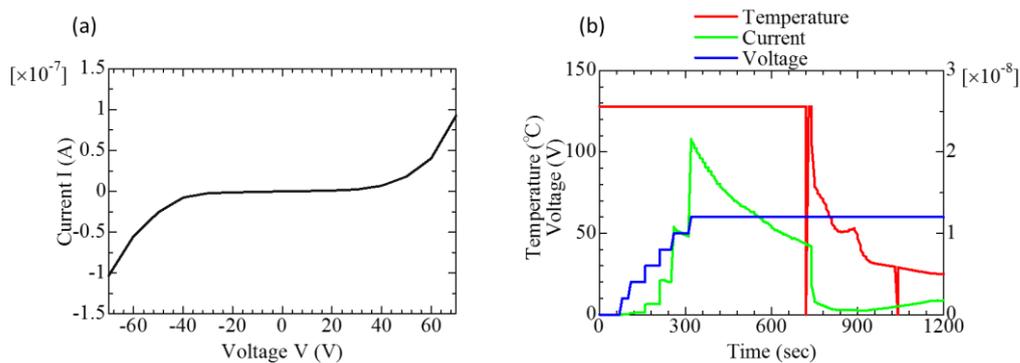


Fig. 8.4 (a)Measured IV characteristic without occurring short. (b)Poling result.

### 8.4 共振測定

前回の変調度改善のためのデバイスは1つのチップ上に6つのデバイスを作製して、そのすべてに共振が見られた。しかし、今回は26個のデバイスを同一チップ上に作製したのだが、強い共振が見られる構造は数個程度であった。デバイスのサイズが大きいと、グレーティングの一部分に不備があつても、ビームをそれ以外の部分に当てることで共振を得ることができるが、デバイスサイズが小さいとグレーティングの不備の影響がでてしまうため、共振が得られないデバイスが多かったと考えられる。

今回は、測定した共振の中で最もQ値が大きいものについて一貫して共振測定から変調帯域測定まで行った。今回の系では透過光を反射光の両者の測定が可能のため、それぞれの共振測定結果を Fig. 8.5 に示す。ただし、透過光の測定では、透過光測定

に用いるファイバーフォーカサが MMF であることが影響して、広いスペクトルの透過光を測定しようとする、正確なデータが測定できなかったため、反射光スペクトルに比べて狭い範囲のスペクトル測定にとどめた。この時の Q 値はおよそ 716 であった。

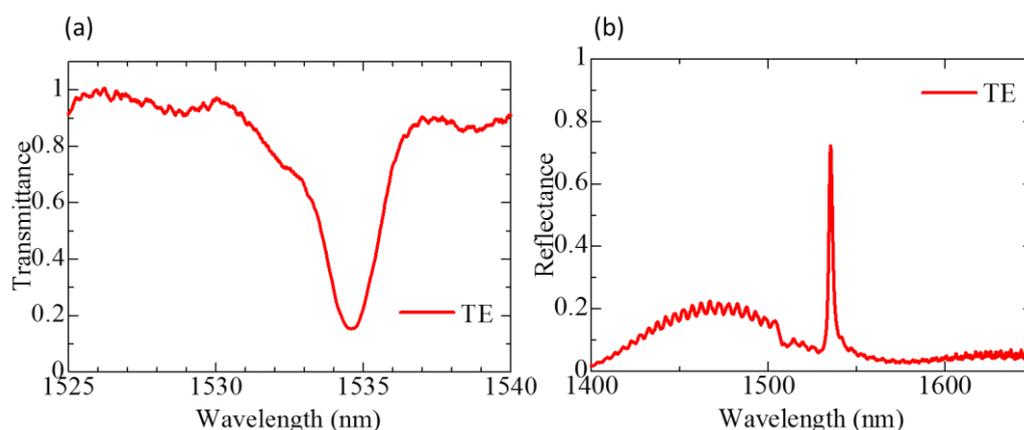


Fig. 8.5 Measured spectrum. (a)Transmittance, (b)Reflectance.

## 8.5 バイアス変調測定

前回の測定と同様に直流のバイアス電圧を印可した際の共振スペクトルの変化を確信した。 $-50\text{ V}$  から  $50\text{ V}$  まで  $10\text{ V}$  刻みにバイアス電圧を印可していった際の共振スペクトルの変化を Fig. 8.6 に示す。明確なスペクトル変化を示していて、変調ができていることが確認できる。Fig. 8.7 には  $\pm 10\text{ V}$  のバイアス電圧によるスペクトルの変化、その時の挿入損失(dB)と変調率(dB)のグラフ、Fig. 8.8 には  $\pm 50\text{ V}$  のバイアス電圧によるスペクトルの変化、その時の変調率(dB)と挿入損失(dB)のグラフを示す。これらは各々透過光と反射光の双方で測定したものである。 $\pm 10\text{ V}$  のバイアス電圧の時、透過光では変調率と挿入損失はそれぞれ、 $2.16\text{dB}$  ( $= 39\%$ )、 $5.27\text{dB}$  である。反射光では、 $1.43\text{dB}$  ( $= 28\%$ )、 $3.99\text{dB}$  である。 $\pm 50\text{ V}$  のバイアス電圧の時、透過光では変調率と挿入損失はそれぞれ、 $8.09\text{dB}$  ( $= 84.5\%$ )、 $1.81\text{dB}$  である。反射光では、 $6.05\text{dB}$  ( $= 75.2\%$ )、 $2.34\text{dB}$  である。

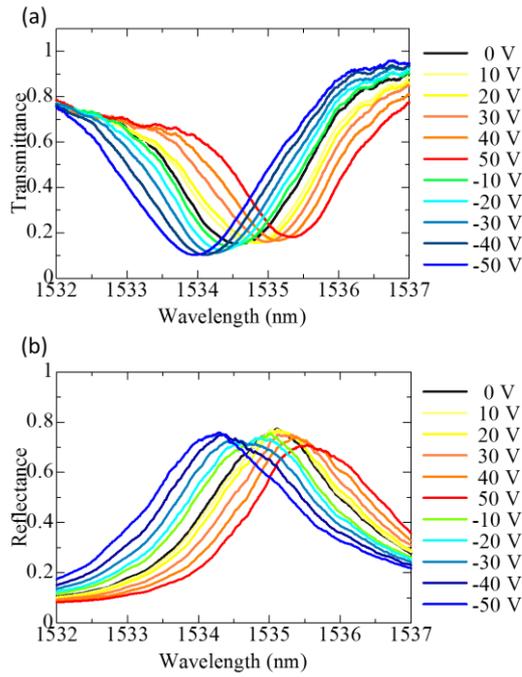


Fig. 8.6 (a)The measured transmittance spectrum under the applied voltage of  $-50\text{ V}$  to  $50\text{ V}$  with step of  $10\text{ V}$ , (b)The measured reflectance spectrum under the applied voltage of  $-50\text{ V}$  to  $50\text{ V}$  with step of  $10\text{ V}$ .

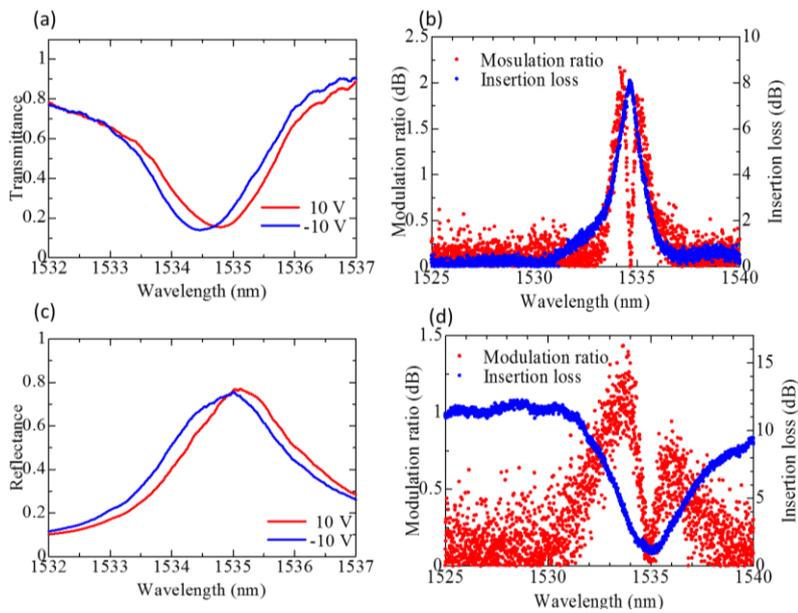


Fig. 8.7 (a)Measured transmittance spectrum under the applied voltage of  $\pm 10\text{ V}$ . (b)Modulation ratio and insertion loss using transmittance spectrum under the applied voltage of  $\pm 10\text{ V}$ . (c)Measured reflectance spectrum under the applied voltage of  $\pm 10\text{ V}$ . (d)Modulation ratio and insertion loss using reflectance spectrum under the applied voltage of  $\pm 10\text{ V}$ .

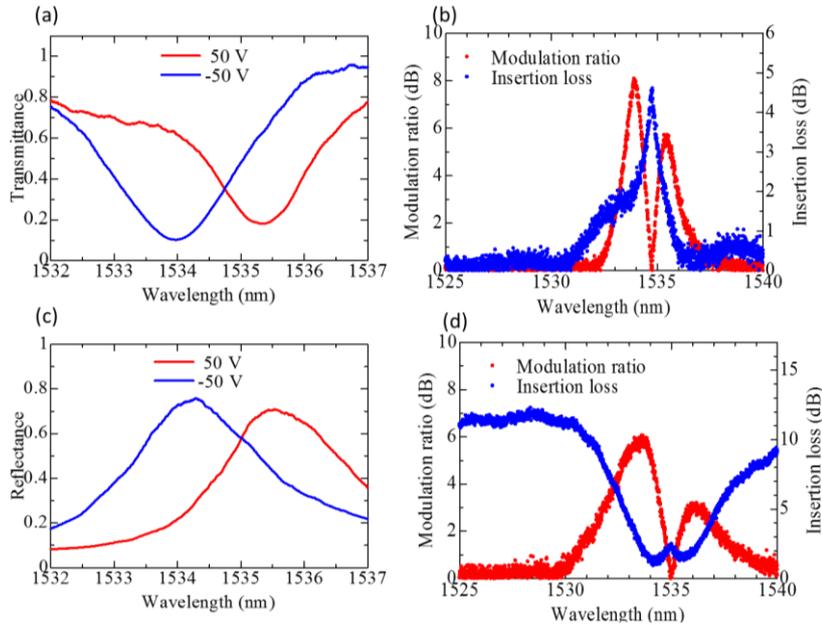


Fig. 8.8 (a) Measured transmittance spectrum under the applied voltage of  $\pm 50$  V. (b) Modulation ratio and insertion loss using transmittance spectrum under the applied voltage of  $\pm 50$  V. (c) Measured reflectance spectrum under the applied voltage of  $\pm 50$  V. (d) Modulation ratio and insertion loss using reflectance spectrum under the applied voltage of  $\pm 50$  V.

## 8.6 交流変調測定

次に交流電界を印可した際の動的な変調を行った。1534 nm の波長において、 $V_{pp} = 20$  V の交流電圧による各周波数での光の透過光及び反射光の変調の様子を Fig. 8.9 に示す。1 kHz の周波数で透過光では最大で 83.6% の強度変調が、反射光では最大で 41.7% の強度変調が実現できている。

透過光および反射光ともに  $\pm 10$  V のバイアス電圧をかけた時の結果に比べて、変調度が 1.5 倍 ~ 2 倍程度大きくなっている。この理由について、考えられる原因になりうる一例は、EO ポリマーと Si の抵抗が比較的近いことである。Fig. 1.8 に示す今回のデバイスの図のように、金属電極にかけられた電圧は、電極としても使われる Si グレーティングを介して、EO ポリマーに印可される。この時、EO ポリマーと Si のグレーティングの抵抗が近いと、直流電圧を印可した場合、Si グレーティングにて電圧降下が起こり、実際にかけている電圧と、EO ポリマーにかけられている電圧に差が生じる。これによって、直流の時は想定より印可された電圧が低く、変調度が小さくなってしまった可能性が考えられる。しかし、実際に等価回路的に EO ポリマー層と Si グレーティングの抵抗値を求めてみると、実際に測定した抵抗率を用いても、およそ  $10^6$  倍程度異なっていたため、この理由は考えづらい。詳しくは付録 C に記す。

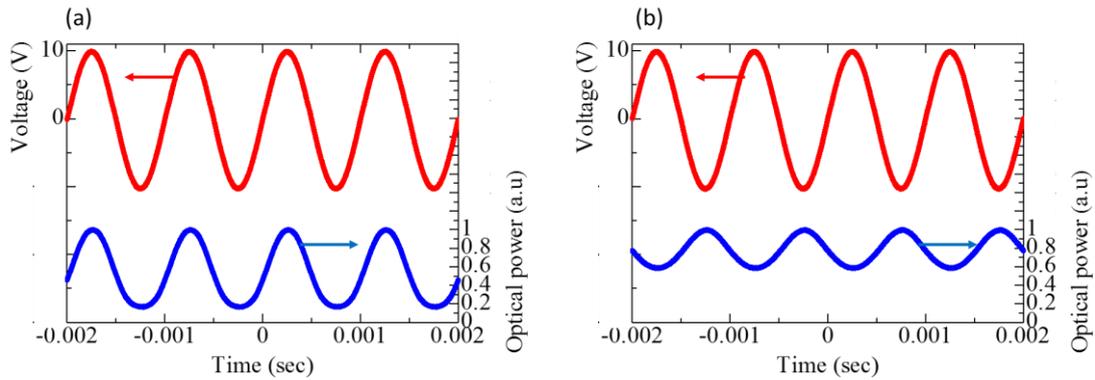


Fig. 8.9 (a)The detected power of the light, when a 1 kHz 20-Vpp sinusoidal modulation signal is applied. (a)Transmittance, (b)Reflectance.

## 8.7 $r_{33}$ に関連して

今回のデバイスについても測定結果とシミュレーションを照らし合わせることによってEO係数 $r_{33}$ を見積もった。シミュレーションでは、EOポリマーの屈折率変化0.002が共振波長変化1nmに対応することが分かったので7.5節と同様に、式(7.1)を用いた。バイアス変調の結果を用いると、 $V_m = 50\text{ V}$ のとき、 $\Delta\lambda = 0.635\text{ nm}$ であり、 $\Delta n_{EO} = 0.00127$ と見積もられ、これと $a = 430\text{ nm}$ を利用することで、 $r_{33} = 15.6\text{ pm/V}$ と見積もることができる。一方、バイアス変調と交流変調の変調度が異なっていたことから、交流変調の変調度が83.6%であったことを用いると、 $r_{33} = 51.2\text{ pm/V}$ となった。

## 8.8 変調帯域測定

このデバイスの変調帯域をネットワークアナライザを用いて測定した。デバイスを全体から分離する前と分離した後のそれぞれについて変調帯域を測定したため、それぞれの結果をFig. 8.10に示す。この時の波長は1534nmである。分離前の3dB帯域はおよそ40MHzであるのに対して、分離後のデバイスは500MHzとなっている。この分離後の帯域は先行研究に比べて約10倍の変調帯域の向上を示している。また、今回のデバイスの変調帯域を式(4.1)を用いて計算すると、 $A = 780\text{ nm}$ ,  $s = 350\text{ nm}$ ,  $t_g = 570\text{ nm}$ ,  $N = 100$ であるので、 $f = 683\text{ MHz}$ であった。よって、今回の測定では性能の約73%が実現できたと考えられるが、例えば、RFケーブルにおける反射なども考えられるため、ある程度妥当な結果が得られたと考えられる。高変調度用のデバイスに対しては、測定値がより計算値に近い結果が得られたため、測定系の改善により測定系で変調帯域が律速されてしまうことを防ぎ、デバイス本来の変調速度により近いものを測定できたのではないと思われる。ただし、Fig. 8.10のデバイス分離後の

グラフを分離前のグラフと比較すると、変調帯域よりも高周波数の領域における、変調度の減衰の傾きが異なることが分かる。これも RF ケーブルにおける反射など様々な要因が考えられるが、再測定ができなかったため、Fig. 8.11 に別のデバイスにおいて 500 MHz 程度の変調帯域の測定結果を示す。これは高周波帯域で理想的な減衰を示している。

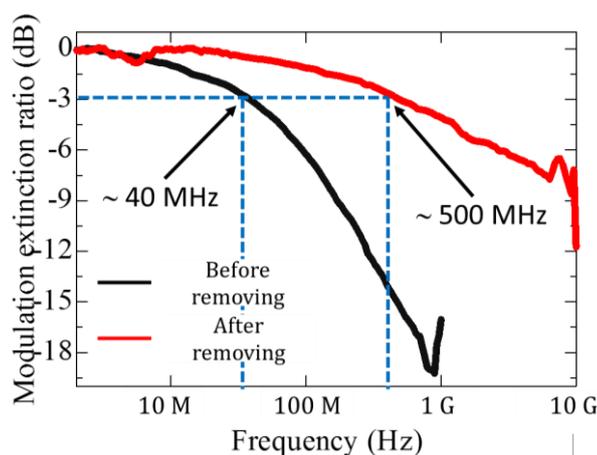


Fig. 8.10 Frequency response of the device at 1534 nm before and after removing from all devices.

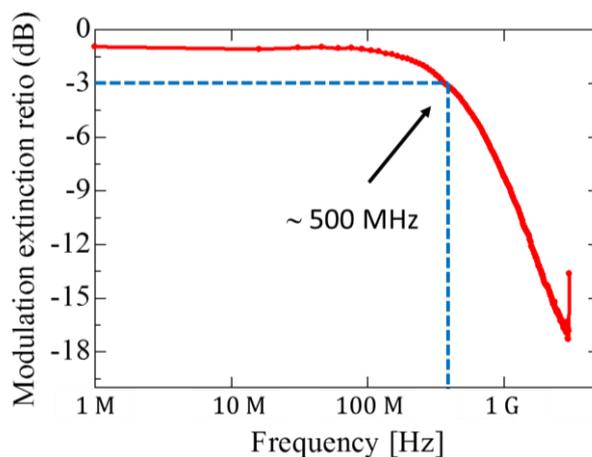


Fig. 8.11 Frequency response of another device.

## 9 結論

本研究は、大容量通信やイメージングの分野へと応用可能な空間光変調器の実現を見据えて、高速、高変調度な強度変調を EO ポリマーと Si-HCG を用いた構造で実現することを目的として行われた。先行研究で原理検証がなされていたのでより高性能な素子を設計、作製することが目標であった。

まず、高変調度な強度変調を実現するために高 Q 値なグレーティング構造の作製を行った。FDTD による数値シミュレーションによって高 Q 値かつ作製誤差に対してロバストな設計値を求めた。ICP-RIE の条件出しを繰り返すことにより、より垂直なグレーティング構造を作製できるようにした。これらの結果、最大で Q 値は 1165 という値が測定でき、先行研究に対しておよそ 20 倍の向上をすることができた。さらに、強度変調度としては先行研究に対して約 12 倍であるおよそ 60%の変調を確認できた。

次に高速な強度変調を実証するためのシミュレーション、設計の改善、新たな光学測定系の立ち上げを行った。シミュレーションでは、グレーティング本数 N が 50 以上では共振の Q 値に大きな影響がなく、この時の変調帯域が 2GHz を超えることから、GHz 以上の変調が本構造のデバイスで十分実現可能であることを示した。新たなマスクパターンを作製し、より効率的なデバイス作製を可能したとともに、より付随する抵抗や容量の小さくなるようなデバイスを設計した。また、従来よりもビーム径が絞れ、アライメントも安定化させることができ、さらに関連研究である位相変調器の位相測定も可能となる系を立ち上げた。その後作製したデバイスでは、Q 値こそ 720 程度であったが、変調度は 83.6%の変調を実現するとともに、変調帯域は 500 MHz まで観測することができた。またこの時の挿入損失はたかだか 2dB 程度であり、高変調度かつ低損失な高速強度変調器を実現することができた。この結果は本構造以外の誘電体メタサーフェスによる強度変調器の実証例の中では最も良い性能を示していると考えている。

今後の研究の課題として 2 つのことが挙げられる。

1 つ目は今の帯域が 500 MHz とサブ GHz の帯域であるため、GHz を超えるような帯域を実現することである。よりビーム幅を絞ることのできる対物レンズを測定系に導入したが、これを用いて実際に測定するには至らなかった。よって、よりサイズの小さいデバイスを作製し、絞ったビームで測定することで低損失、高 Q 値な共振を確認した後、GHz を超える変調を確認できるのではないかと考える。また、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の基板を用いてデバイスの作製もしたのだが、十分な共振を得るには至らなかったが、これはこのドーピング濃度の基板での条件出しが十分に行われなかったためだと考えられる。この条件出しも進めていく必要がある。

2つ目は2次元アレイ化の実現である。今回の研究では1ピクセルのみの強度変調器の実現にとどまっていたのだが、空間光変調器の利点としては2次元アレイ化することが挙げられるので、この実現が必要不可欠である。配線をどのように配置するかについての議論を進めることでアレイ状の変調器の実現が可能だと考えられる。

以上の2つに加え、現在研究室で進められている位相変調器の実証がなされたとしたら、光の強度と位相をGHz以上の帯域で効率的に変調することが可能になる。これを実現することができれば、通信やイメージングなど幅広い分野へと応用可能な従来素子に置き換わる新たな空間光変調器を実現できると信じている。

## 付録 A デバイスサイズの共振に与える影響

本文中の 4.6 節でも言及しているが、デバイスサイズの共振  $Q$  値に与える影響を実際に作製したデバイスを測定することで検証した。ここではデバイスのグレーティングの本数  $N$  を 15 本、25 本、50 本、75 本、100 本と変化させた際の共振の様子をシミュレーションと実際の測定値で比較する。デバイスの周期は  $\Lambda = 780 \text{ nm}$ 、グレーティング幅は  $s = 350 \text{ nm}$  である。これはシミュレーションと実際の測定で共通である。また、この周期の時の各グレーティング本数の時のデバイスの 1 辺の長さ  $L$  はそれぞれ、 $11.7 \mu\text{m}$ 、 $19.5 \mu\text{m}$ 、 $39 \mu\text{m}$ 、 $58.5 \mu\text{m}$ 、 $78 \mu\text{m}$  である。また、シミュレーションのサイズのガウシアンビームのサイズは直径で  $50 \mu\text{m}$  とした。Fig. A-1 にシミュレーション及び測定した結果を示す。 $N$  が小さくなるにつれて、共振の幅が大きくなるとともに、共振波長が短波長側にわずかに変化している傾向がシミュレーションと測定結果で一致している。また、Fig. A-2 に  $N$  に対する  $Q$  値の変化の様子をシミュレーションと測定の双方について示している。シミュレーションでは  $N = 50$  以上ではほとんど  $Q$  値の劣化がなく、損失も大きくはなかったのだが、測定では  $N = 50$  では  $Q$  値の劣化は大きくないものの、損失が  $N = 75, 100$  と比べて大きくなってしまっていた。また、 $N = 15, 25$  の結果については、シミュレーションではわずかながらしっかりと共振の様子を確認できているのだが、測定ではほとんど共振を観測することができない結果になった。その理由として一番考えられるのは、実際のビームサイズが想定より大きくなってしまっているということである。設計では  $42 \mu\text{m}$  のビーム径であったが、実際にはこのサイズより大きくなってしまっている可能性がある。ただし、今回の研究で用いなかった 20 倍の対物レンズを用いることでビーム幅は  $10 \mu\text{m}$  程度まで絞ることができる。このようにしてビームを絞ることによって、 $N = 50$  以下でも十分な  $Q$  値と低損失を満たす共振が測定できると考えられる。その結果、より小さなデバイスにおいて強度変調を実現することができ、GHz 以上の強度変調を実現できるのではないかと考えられる。

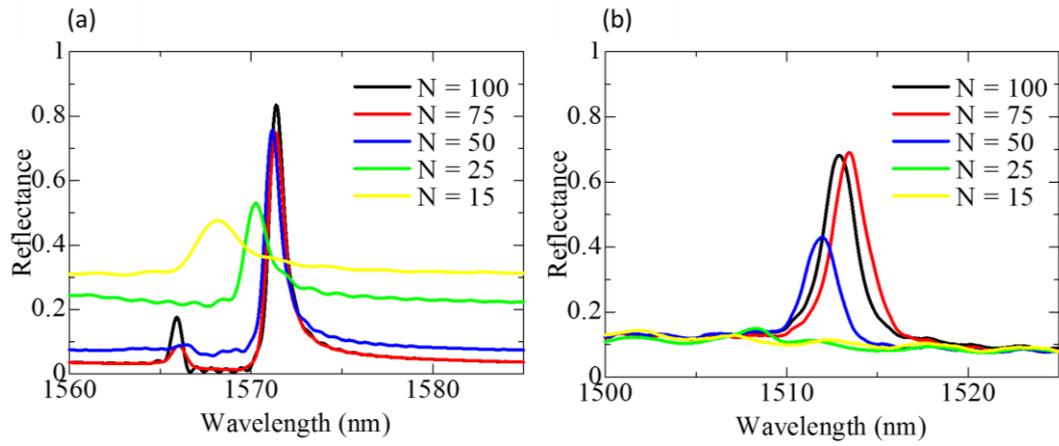


Fig. A-1 (a) Simulation of reflectance spectrum with various grating number  $N = 15, 25, 50, 75, 100$ . (b) Measurement of reflectance spectrum with various grating number  $N = 15, 25, 50, 75, 100$ .

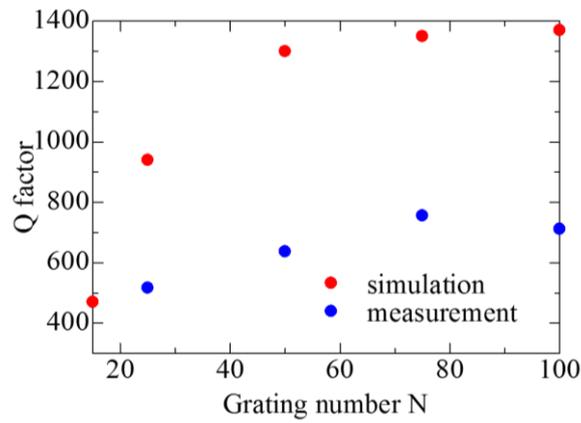


Fig. A-2 Change of Q factor with grating number (simulation and measurement).

## 付録 B ドーピング濃度が共振、変調に与える影響

本文中の 4.5 節で説明したように今回の研究では 2 つの異なる濃度でドーピングした SOQ 基板を用いてデバイスの作製、測定を行った。しかし、本文中の高速変調を実証したデバイスの基板は 2 つのうちの 1 つにおいてのみである。その理由等をこの章では考察する。まず、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の各濃度の基板上に作った、周期が  $\Lambda = 780 \text{ nm}$ 、グレーティング幅が  $s = 350 \text{ nm}$  であるデバイスについて共振測定をした結果を Fig. B-1 に示す。この時の Q 値は  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の各濃度において、それぞれ 607、347 である。さらに、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  では  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  に比べて大きな損失を生じていることが分かる。Q 値の劣化は本文中にも言及したため考えられ、さらに損失も考えられる。ただし、これほど大きな損失はシミュレーションでは生じていなかった。この原因として考えられるのは、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の濃度の基板を用いた条件出し不足である。条件出しは Si ダミーや低濃度のドーピング濃度の SOQ 基板であった。よってグレーティングの形状に何らかの誤差が生じている可能性は考えられる。また、実際の基板の吸光度を測定できていないため、実はシミュレーションに用いた文献値よりも大きな吸光度をもっていて、吸収が大きい可能性がある。よって、実際にこの原因を究明し、低損失なデバイスを  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の基板上に作るものが求められる。

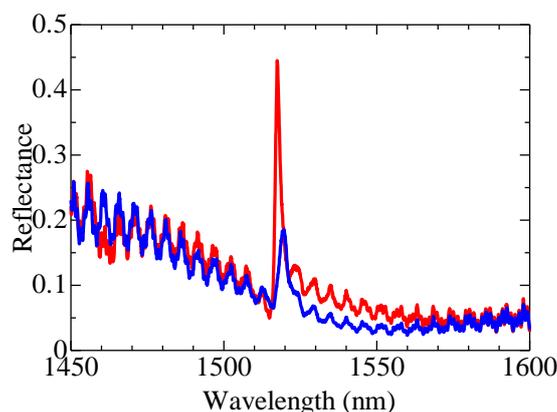


Fig. B-1 Reflectance spectrum difference between wafer doping density of  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  and  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

さらに、各基板の抵抗率の測定も行った。Fig. B-2 に示すような領域を、様々な電極間距離を持つようにしたものをマスクに追加していたため、この領域を用いて IV 測定を行った。その結果を Fig. B-3 に示す。切片はこの時の接触抵抗に相当するた

め、各距離においてこの値を除いたものが抵抗の値に相当する。各濃度での抵抗率をこの結果から計算すると、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ では  $2.26 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}$  であり、理論値の  $2.50 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}$  に近い値となっている。一方、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ でも  $6.16 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$  であり、理論値の  $6.0 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}$  に近い値となっている。よって、抵抗率の点では理想的な基板であるといえる。よって、先ほどの低損失なデバイスを作製することができれば、10 GHz 程度の強度変調も実証できるのではないかと考えられる。

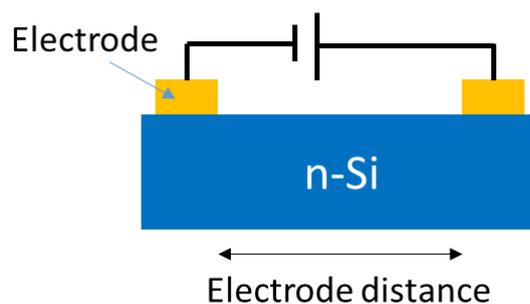


Fig. B-2 Schematic model of IV measurement for wafer of each doping density.

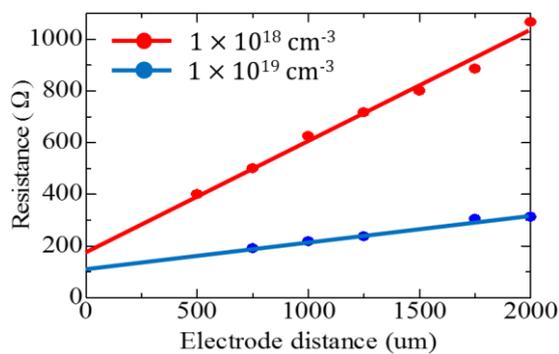


Fig. B-3 Resistance for wafer of each doping density.

## 付録 C 直流と交流の変調度の違いに関する 考察

8.6節でも述べたが、高速変調用のデバイスを測定した際に DC バイアスによる測定と AC による測定によって変調度が 1.5 倍から 2 倍ほど異なっていた。この理由について、考えられる原因になりうる一例は、EO ポリマーと Si の抵抗が比較的近いことである。Fig. 1.8 に示す今回のデバイスの図のように、金属電極にかけられた電圧は、電極としても使われる Si グレーティングを介して、EO ポリマーに印可される。この時、EO ポリマーと Si のグレーティングの抵抗が近いと、直流電圧を印可した場合、Si グレーティングにて電圧降下が起こり、実際にかけている電圧と、EO ポリマーにかけられている電圧に差が生じる。これによって、直流の時は想定より印可された電圧が低く、変調度が小さくなってしまった可能性が考えられる。Fig. C-1 にこの時の抵抗と、実際のサイズを記している。Si の抵抗率は付録 B で計算した、 $2.26 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$  を用いて、EO ポリマーの抵抗率は Fig. C-2 に示した図によって測定した値である、 $1.0 \times 10^7 \Omega\text{m}$  を用いることにする。これらの値を用いると図の  $R_{\text{Si}}$  と  $R_{\text{EO}}$  を計算すると、それぞれ  $8.4 \times 10^4 \Omega$ 、 $9.2 \times 10^{10} \Omega$  となる。このように  $10^6$  程度値が異なっているため、Si のグレーティングにおいての電圧降下は無視できると考えられる。したがって、これとは異なる原因があると考えられるが、現時点ではまだはっきりとした理由が分かっていなく考察中である。

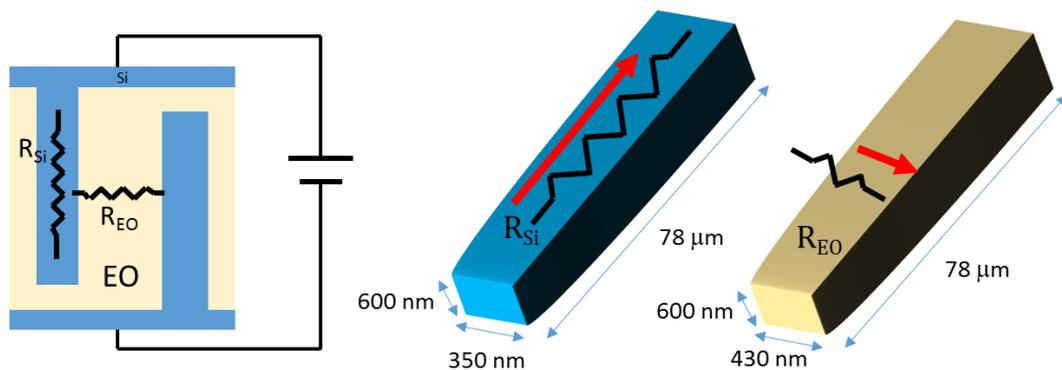


Fig. C-1 Resistance of Si grating and EO polymer.

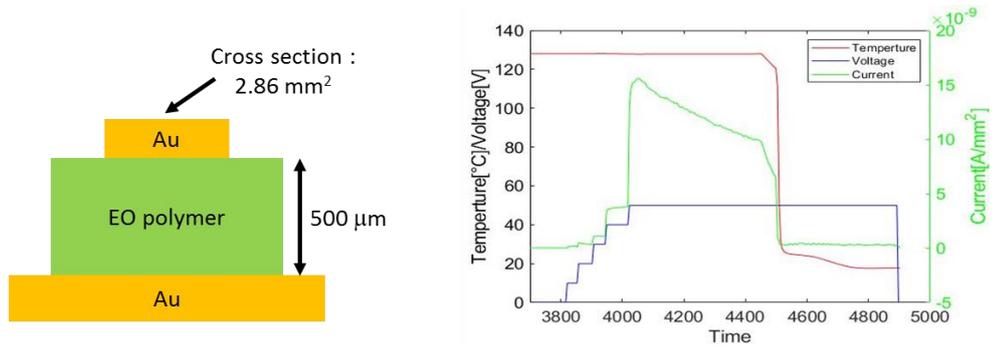


Fig. C-2 Device for resistivity of EO polymer and measurement result.

## 付録 D 位相変調器

### D.I 位相変調器の構造

本文中や先行研究[38,39]において言及しているが、本研究の構造にミラーを付けくわえることによって垂直入射型の位相変調器として利用することができる。先行研究[54]において、Fig. 1.8(c)に示されるようなデバイスの試作がなされた。しかし、金属ミラーのついた基板を作製する際のファブリケーション上の問題が生じたために、実際に位相変調器の実証をするには至らなかった。そこで、ファブリケーション上の難点を除去するために、Fig. D-1 に示すような、基板の表側に金属ミラーを付けた位相変調器を提案し、このデバイスの作製を行うことにした。

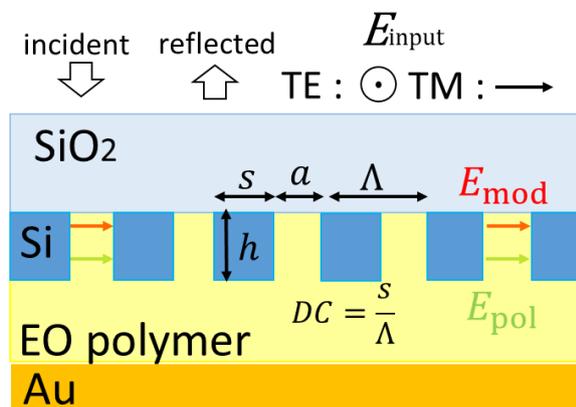


Fig. D-1 Schematic of new phase modulator

### D.II シミュレーション

提案構造の位相変調器について FDTD 法を用いて数値シミュレーションを行った。 $\Lambda = 780 \text{ nm}$ ,  $s = 400 \text{ nm}$ ,  $\theta = 83^\circ$  の構造で、EO ポリマーの厚みを  $1.5 \mu\text{m}$  として、EO ポリマーの屈折率変化  $\Delta n_{\text{EO}} = 0$  と  $\Delta n_{\text{EO}} = 0.001$  としてシミュレーションを行った。その時の位相スペクトル及び屈折率変化に伴う位相変化のスペクトルを Fig. D-2 に示す。1548 nm 付近で急激に位相が変化していることが分かる。その変化量はおよそ  $2\pi$  である。また屈折率変化 0.001 においておよそ 5 rad の位相変調が得られることが分かる。

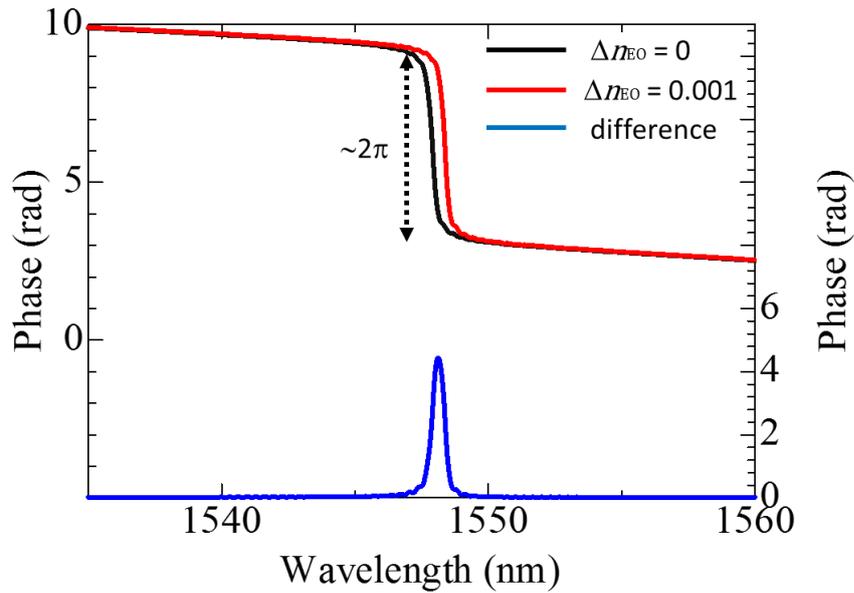


Fig. D-2 Simulation for phase modulator.

### D.III プロセス

Fig. D-1 に示す位相変調器の作製に向けてのプロセスフローを Fig. D-3 に示す。(1)~(10)、(13)~(15)は本文で説明した強度変調器と同様であるため、6.1 節と全く同様である。(11)、(12)は位相変調器独自のプロセスであるので、このプロセスについて簡単に説明する。

#### ⑪ カプトンテープによる電極部の保護及び金のスパッタリング

電極パターンがグレーティングの存在している、チップの表側に存在しているため、グレーティングの上部には金が蒸着されていて、電極部には蒸着されていない状況を作りたい。そのために、カプトンテープを EO ポリマーののった電極パターンの上部から貼り、その上から金をスパッタリングした。テープをはがしたときにテープの粘着力が残っていると、電極として用いるときに不具合が生じる恐れがあるため、できるだけ薄いカプトンテープを用いることにした。その後、金のスパッタリングを、武田 CR の芝浦 CFS-4EP-LL を用いて、約 100 nm スパッタリングした。詳細条件は Table D-1 の通り。

Table D-1 Condition of Au sputtering

Gas	Ar	Rotation speed	20.0 rpm
Flow rate	23.0 sccm	Sputter time	260 sec
Power	200 W		

⑫ カプトンテープの除去

金のスパッタリング後にカプトンテープをはがすことで、グレーティング上部のみに金が蒸着されている構造を得ることができる。

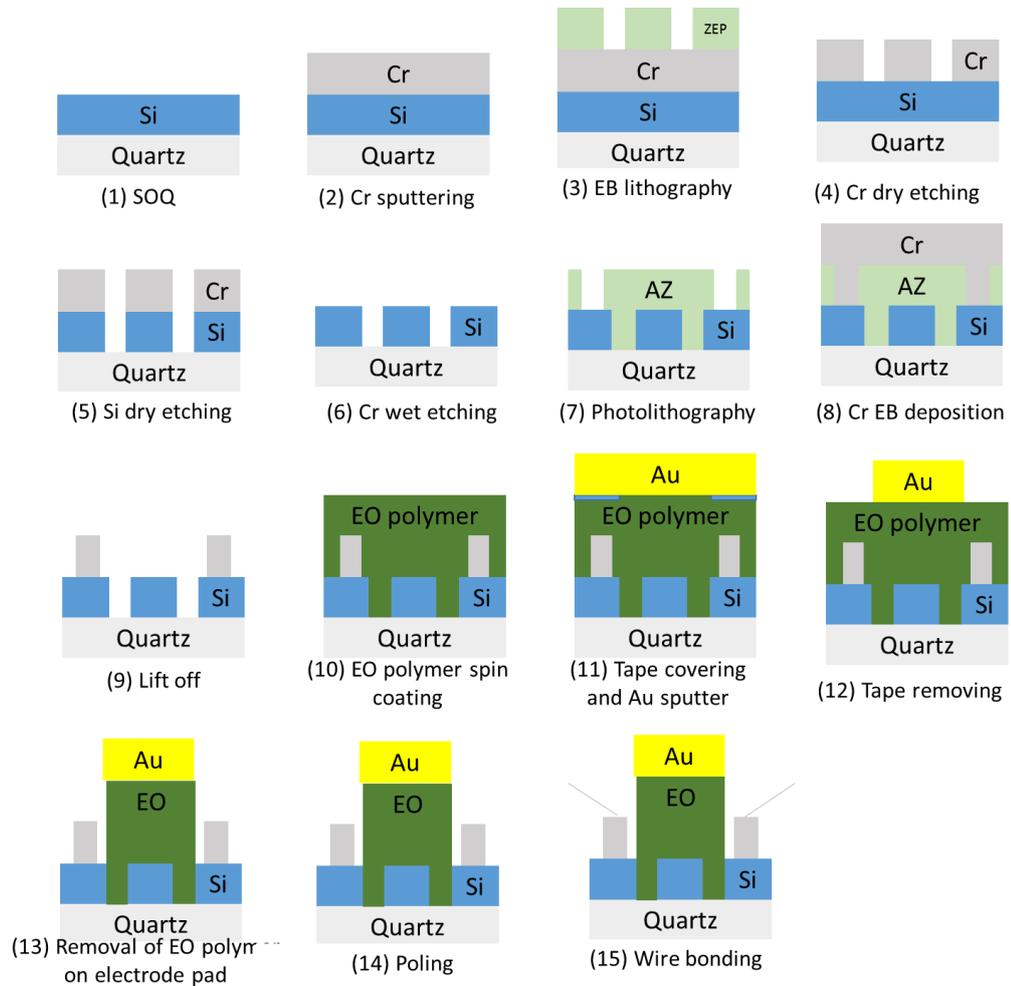


Fig. D-3 Process flow for new phase modulator

このプロセスフローに従って作製したデバイスの写真を Fig.D-4 に示す。チップの表側からは、グレーティングの上部に金が蒸着されているのが分かり、裏側からは、グレーティングがきれいに作製されていることが分かる。

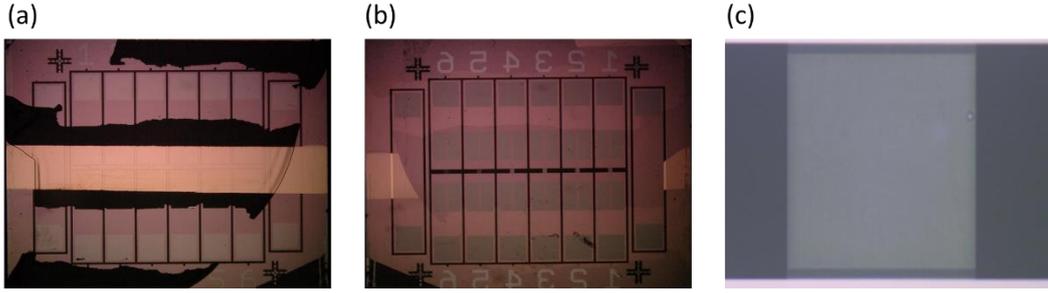


Fig. D-4 Device microscope image. (a)Front side, (b)Back side, (c)Si grating from back side.

## D.IV 測定系、測定方法

この位相変調器を測定するための測定系は、参考文献[55,56]の位相測定法を参考に組んだ。入射波は半波長板(Half wave plate ; HWP)、四分の一波長板(Quarter wave plate ; QWP)及びデバイスを通することによってジョーンズベクトルが変化する。HWP と QWP をある角度で回転させたときの、反射光の2つ偏波のパワーを測定することによって、位相情報を計算する手法である。本文の強度変調測定のために測定系(Fig. 5.2(a)) は位相変調も確認できるように組んだため、この測定系を用いた。Fig. D-5 に計算に用いる部分についての測定系を示しておく。この測定系による位相測定の測定手法を以下に示す。

入射波のジョーンズ行列、HWP、QWP 及びデバイスのジョーンズ行列をそれぞれ  $E_{in}$ 、 $H$ 、 $Q$ 、 $D$  とする。さらに、HWP の回転を表す回転行列を  $R_1$ 、QWP の回転を表す回転行列を  $R_2$  とする。デバイスからの反射波が HWP を通った後のジョーンズ行列は  $E_{out}$  とする。すると、 $E_{out}$  は以下のように表される。ただし、 $R_1'$ 等は逆行列を表すとする。

$$E_{out} = R_1' \cdot H \cdot R_1 \cdot R_2' \cdot Q \cdot R_2 \cdot D \cdot R_2 \cdot Q \cdot R_2 \cdot R_1' \cdot H \cdot R_1 \cdot E_{in} \quad (D.1)$$

ここで、各種ベクトル及び行列は以下のように表される。ただし、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ はそれぞれ HWP と QWP の角度を表す。

$$E_{in} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, E_{out} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix},$$

$$R_1 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \end{pmatrix}, R_2 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) \end{pmatrix} \quad (D.2)$$

さらに、今回の系では垂直偏波を TE 偏波とし、水平偏波を TM 偏波としたため、

$$\mathbf{E}_{TE} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{E}_{TM} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{D.3})$$

と表すことができる。デバイスのジョーンズ行列は  $r_{TE}$ 、 $r_{TM}$  をそれぞれ TE 波、TM 波に対するデバイスの反射係数として、 $e^{i\Delta}$  をデバイスによる位相変化量とすると、

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} r_{TM} & 0 \\ 0 & r_{TE} \cdot e^{i\Delta} \end{pmatrix} \quad (\text{D.4})$$

となる。

ここで、HWP の角度を  $22.5^\circ$ 、QWP の角度を  $45^\circ$  とし、I1、I2 をデバイスからの反射波の各偏光パワーとすると、 $I_1 = E_1^2$ 、 $I_2 = E_2^2$  となり、以下のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} I_2 \\ I_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} r_{TE}^2 + r_{TM}^2 - 2r_{TE}r_{TM}\cos(\Delta) \\ r_{TE}^2 + r_{TM}^2 + 2r_{TE}r_{TM}\cos(\Delta) \end{pmatrix} \quad (\text{D.5})$$

これより、 $\cos(\Delta)$  は、

$$\cos(\Delta) = \frac{1}{2} \frac{r_{TE}^2 + r_{TM}^2}{r_{TE}r_{TM}} \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (\text{D.5})$$

と表すことができる。ここで、 $r_{TE}$ 、 $r_{TM}$  を求めればよい。 $r_{TE}$  は、HWP と QWP を  $0^\circ$  にすることで、

$$\begin{pmatrix} I_2 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ r_{TE}^2 \end{pmatrix} \quad (\text{D.6})$$

となり、 $r_{TM}$  は、HWP を  $45^\circ$ 、QWP を  $0^\circ$  にすることで、

$$\begin{pmatrix} I_2 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ r_{TM}^2 \end{pmatrix} \quad (\text{D.7})$$

となり、求めることができる。これらを用いることによって、デバイスによる位相変化量  $\Delta$  を求めることができる。

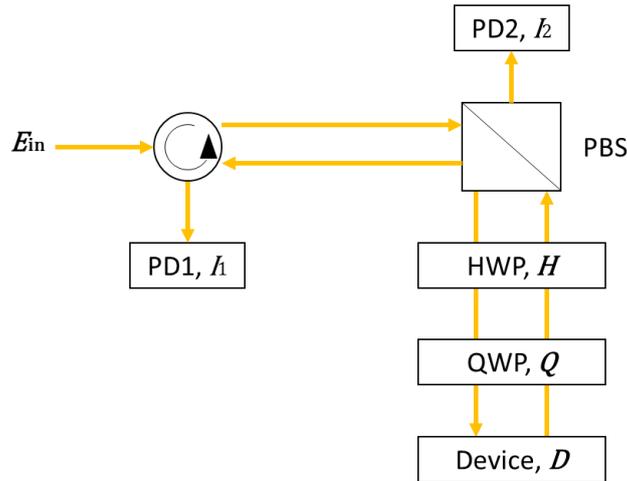


Fig. D-5 Part of measurement setup for phase modulator

## D.V 測定

前節で紹介した位相解析手順に従って、光学測定を行った。Fig. D-6 に波長板を回したときの各ポートの光パワーの反射スペクトルを示す。それぞれ、(a)HWP が  $22.5^\circ$ 、QWP が  $45^\circ$ の時の  $I_1$ 、(b)HWP が  $22.5^\circ$ 、QWP が  $45^\circ$ の時の  $I_2$ 、(c)HWP が  $0^\circ$ 、QWP が  $0^\circ$ の時の  $I_1$ 、(d)HWP が  $45^\circ$ 、QWP が  $0^\circ$ の時の  $I_1$ となっている。これらのスペクトルを用いて、波長ごとに式(C.5)を用いて位相変化量 $\Delta$ を求めると、Fig. D-7(a)に示すようになる。さらに、位相が  $0$  及び $\pi$ となるところにおいてグラフを折り返したものを(b)に示す。(b)から分かるように、共振波長付近において位相がおおよそ  $2\pi$ 変化していることが分かる。また、グラフに生じている振動は基板におけるファブリペロー共振である。

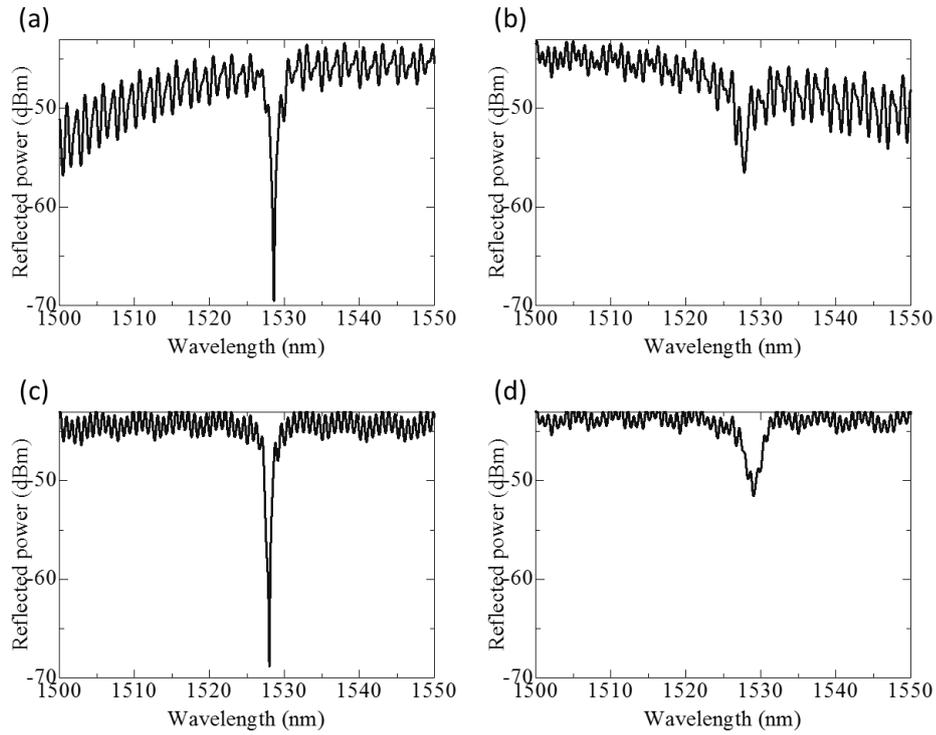


Fig. D-6 Reflectance spectrum, (a)  $I_1$  @  $\theta_1(\text{HWP}) = 22.5^\circ$ ,  $\theta_2(\text{QWP}) = 45^\circ$ , (b)  $I_2$  @  $\theta_1 = 22.5^\circ$ ,  $\theta_2 = 45^\circ$ , (c)  $I_1$  @  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 0^\circ$ , (d)  $I_1$  @  $\theta_1 = 45^\circ$ ,  $\theta_2 = 0^\circ$ .

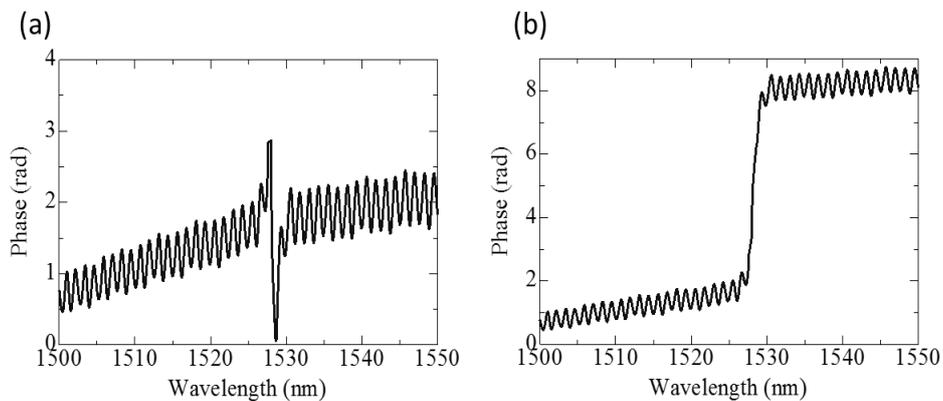


Fig. D-7 Measured phase of phase modulator, (a)Raw data, (b)Wrapped data.

次にバイアス電圧を印可し、同様の測定を行うことで、位相変調の確認を行った。その時の位相変化のスペクトルを Fig. D-8 に示す。(a)に 0 V と  $\pm 30$  V のバイアス電圧を印可したときの位相変化を示し、(b)にその拡大図を示す。(b)を見ると、バイアス電圧を印可すると位相が変化している様子が分かる。この位相変化量は最大で、1.3 rad 程度であった。

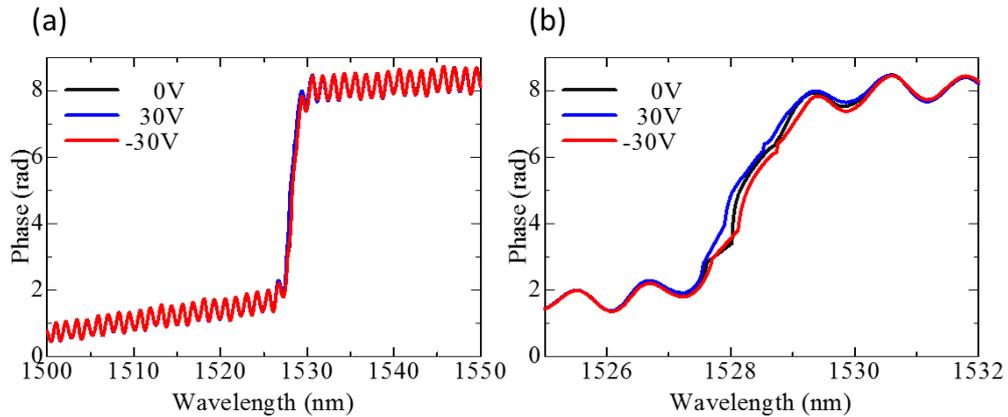


Fig. D-8 Measurement of phase modulation, (a) The measured transmittance spectrum under the applied voltage of -30 V, 0 V and 30 V, (b) Magnified graph.

## D.VI 考察

今回の位相変調の測定ではわずかではあるが位相変調が確認できた。ただし、測定を繰り返す中で、基板におけるファブリペロー共振の影響が共振に影響を与えることがあることが分かったため、より正確な測定をするためには基板に AR コートを施すなどして、このファブリペロー共振を取り除く必要がある。また、今回の測定では、波長スペクトルを測定する際に共振が確認されたが、本来の目的は強度変調の生じない、All-Pass 型の位相変調器の実証であった。EO ポリマーや Si による損失により共振が生じていると考えられるため、ただ Q 値が高い設計値を探すのではなく、これらの損失を考慮したうえで、最適な設計値を求める必要があると考えられる。さらに、位相変調器の変調効率増大のための各種シミュレーション、条件出しも必要であると考えられる。測定方法についても簡単のために今回の測定手法をとったが、これが最適であるとは限らず、参考文献[55,56]に示すような、測定結果とシミュレーション結果をフィッティングすることによる位相解析法や、強度変調と位相変調を分離することでそれぞれについて別のポートで観測する方法など様々な手法が考えられる。上記にあげたような点を改善することによって、より正確で効率の良い位相変調の測定し、位相変調器の実証がされることを望んでいる。

## 参考文献

- [1] Neff, J. A., Athale, R. A., & Lee, S. H. (1990). Two-Dimensional Spatial Light Modulators; A Tutorial. *Proceedings of the IEEE*, 78(5), 826–855.
- [2] Rabinovich, W. S., Moore, C. I., Mahon, R., Goetz, P. G., Burris, H. R., Ferraro, M. S., ... Suite, M. R. (2015). Free-space optical communications research and demonstrations at the US Naval Research Laboratory. *Applied Optics*, 54(31), F189.
- [3] McFadden, M. J., Iqbal, M., Dillon, T., Nair, R., Gu, T., Prather, D. W., & Haney, M. W. (2006). Multiscale free-space optical interconnects for intrachip global communication; Motivation, analysis, and experimental validation. *Applied Optics*.
- [4] Christensen, M. P., Milojkovic, P., McFadden, M. J., & Haney, M. W. (2003). Multiscale optical design for global chip-to-chip optical interconnections and misalignment tolerant packaging. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*.
- [5] Gilbreath, G. C. (2001). Large-aperture multiple quantum well modulating retroreflector for free-space optical data transfer on unmanned aerial vehicles. *Optical Engineering*, 40(7), 1348.
- [6] Schwarz, B. (2010). Lidar; Mapping the world in 3D. *Nature Photonics*, 4(7), 429–430.
- [7] Horie, Y., Arbabi, A., Arbabi, E., Kamali, S. M., & Faraon, A. (2018). High-Speed, Phase-Dominant Spatial Light Modulation with Silicon-Based Active Resonant Antennas. *ACS Photonics*, 5(5), 1711–1717.
- [8] Weigel, P. O., Zhao, J., Fang, K., Al-Rubaye, H., Trotter, D., Hood, D., Mookherjea, S. (2018). Bonded thin film lithium niobate modulator on a silicon photonics platform exceeding 100 GHz 3-dB electrical modulation bandwidth. *Optics Express*.
- [9] Alloatti, L., Palmer, R., Diebold, S., Pahl, K. P., Chen, B., Dinu, R., Leuthold, J. (2014). 100 GHz silicon-organic hybrid modulator. *Light: Science and Applications*.
- [10] Zhang, Z., You, Z., & Chu, D. (2014). Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices. *Light: Science and Applications*.
- [11] Shrauger, Vern & Warde, Cardinal. (2001). Development of a high-speed high-fill-factor phase-only spatial light modulator. 4291. 10.1117/12.424843.
- [12] Yang, W., Tianbo Sun, Yi Rao, Megens, M., Trevor Chan, Byung-Wook Yoo, Chang-Hasnain, C. J. (2012). High-speed optical phased array using high-contrast

- grating all-pass filters. In Conference Proceedings - International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (pp. 22–24).
- [13] Audet, R. M., Edwards, E. H., Balram, K. C., Claussen, S. A., Schaevitz, R. K., Tasyurek, E., ... Miller, D. A. B. (2013). Surface-normal ge/SiGe asymmetric fabry-perot optical modulators fabricated on silicon substrates. *Journal of Lightwave Technology*, 31(24), 3995–4003.
- [14] E. Edwards, R. Audet, E. Fei, S. Claussen, R. Schaevitz, E. Tasyurek, Y. Rong, T. Kamins, J. Harris, and D. Miller, "Ge/SiGe asymmetric Fabry-Perot quantum well electroabsorption modulators," *Opt. Express* 20, 29164-29173 (2012).
- [15] O. Kulkarni, M. Islam, and F. Terry, "GaAs-based surface-normal optical modulator compared to Si and its wavelength response characterization using a supercontinuum laser," *Opt. Express* 19, 4076-4084 (2011).
- [16] Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., & Schultz, S. (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters*.
- [17] 石原照也, “電磁メタマテリアルの研究動向,” 応用物理学会 36 卷 10 号、2007
- [18] Li, A., Singh, S., & Sievenpiper, D. (2018). Metasurfaces and their applications. *Nanophotonics*.
- [19] Li, A., Luo, Z., Wakatsuchi, H., Kim, S., & Sievenpiper, D. F. (2017). Nonlinear, Active, and Tunable Metasurfaces for Advanced Electromagnetics Applications. *IEEE Access*.
- [20] Sievenpiper, D., Zhang, L., Jimenez Broas, R. F., Alexöpolous, N. G., & Yablonovitch, E. (1999). High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.
- [21] Liu, N., Mesch, M., Weiss, T., Hentschel, M., & Giessen, H. (2010). Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor. *Nano Letters*.
- [22] Li, Y. B., Li, L. L., Cai, B. G., Cheng, Q., & Cui, T. J. (2015). Holographic leaky-wave metasurfaces for dual-sensor imaging. *Scientific Reports*.
- [23] Zhu, B., Feng, Y., Zhao, J., Huang, C., & Jiang, T. (2010). Switchable metamaterial reflector/absorber for different polarized electromagnetic waves. *Applied Physics Letters*.
- [24] Miao, Z., Wu, Q., Li, X., He, Q., Ding, K., An, Z., Zhou, L. (2015). Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces. *Physical Review X*.

- [25] Olivieri, A., Chen, C., Hassan, S., Lisicka-Skrzek, E., Tait, R. N., & Berini, P. (2015). Plasmonic Nanostructured Metal-Oxide-Semiconductor Reflection Modulators. *Nano Letters*.
- [26] Smolyaninov, A., El Amili, A., Vallini, F., Pappert, S., & Fainman, Y. (2019). Programmable plasmonic phase modulation of free-space wavefronts at gigahertz rates. *Nature Photonics*.
- [27] Ren, F., Li, M., Gao, Q., Cowell, W., Luo, J., Jen, A. K. Y., & Wang, A. X. (2015). Surface-normal plasmonic modulator using sub-wavelength metal grating on electro-optic polymer thin film. *Optics Communications*, 352, 116–120.
- [28] Zaki, Aya & Kirah, Khaled & Swillam, Mohamed. (2016). Hybrid plasmonic electro-optical modulator. *Applied Physics A*. 122. 10.1007/s00339-016-9843-y.
- [29] Zhang, J., Kosugi, Y., Otomo, A., Ho, Y. L., Delaunay, J. J., Nakano, Y., & Tanemura, T. (2018). Electrical tuning of metal-insulator-metal metasurface with electro-optic polymer. *Applied Physics Letters*.
- [30] Dabidian, N., Dutta-Gupta, S., Kholmanov, I., Lai, K., Lu, F., Lee, J., Shvets, G. (2016). Experimental demonstration of phase modulation and motion sensing using graphene-integrated metasurfaces. *Nano Letters*, 16(6), 3607–3615.
- [31] Dabidian, N., Dutta-Gupta, S., Kholmanov, I., Lai, K., Lu, F., Lee, J., Shvets, G. (2016). Experimental demonstration of phase modulation and motion sensing using graphene-integrated metasurfaces. *Nano Letters*, 16(6), 3607–3615.
- [32] Dabidian, N., Dutta-Gupta, S., Kholmanov, I., Lai, K., Lu, F., Lee, J., Shvets, G. (2016). Experimental demonstration of phase modulation and motion sensing using graphene-integrated metasurfaces. *Nano Letters*, 16(6), 3607–3615.
- [33] Alloatti, L., Palmer, R., Diebold, S., Pahl, K. P., Chen, B., Dinu, R., Leuthold, J. (2014). 100 GHz silicon-organic hybrid modulator. *Light: Science and Applications*.
- [34] Dalton, L. R., Sullivan, P. A., & Bale, D. H. (2010). Electric field poled organic electro-optic materials; State of the art and future prospects. *Chemical Reviews*, 110(1), 25–55.
- [35] Otomo, A. & Yamada, Toshiki & Inoue, Shin-ichiro. (2013). Organic electro-optic polymer devices for ultra-high-speed optical communication. *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*. 60. 3-12.
- [36] Jouane, Y., Chang, Y.-C., Zhang, D., Luo, J., Jen, A. K.-Y., & Enami, Y. (2014). Unprecedented highest electro-optic coefficient of 226 pm/V for electro-optic polymer/TiO<sub>2</sub> multilayer slot waveguide modulators. *Optics Express*.

- [37] Wang, X., Lin, C.-Y., Chakravarty, S., Luo, J., Jen, A. K.-Y., & Chen, R. T. (2011). Effective in-device  $r_{33}$  of 735 pm/V on electro-optic polymer infiltrated silicon photonic crystal slot waveguides. *Optics Letters*.
- [38] Kosugi, Y., Yamada, T., Otomo, A., Nakano, Y., & Tanemura, T. (2016). Surface-normal electro-optic-polymer modulator with silicon subwavelength grating. *IEICE Electronics Express*.
- [39] 小杉優地, “シリコンサブ波長格子を用いた電気光学ポリマー垂直入射型光変調器,” 東京大学大学院修士論文(2018)
- [40] Aoki, I. & Miki, H. & Otomo, A. (2013). Development of organic electro-optic materials and its evaluation techniques. *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*. 60. 13-17.
- [41] R.W.Boyd, 'Nonlinear Optics' 3rd Ed., Academic Press p.514-p.518 (2008)
- [42] Burland, D. M., Miller, R. D., & Walsh, C. A. (1994). Second-Order Nonlinearity in Poled-Polymer Systems. *Chemical Reviews*, 94(1), 31–75.
- [43] J.Liu et al., *RSC Adv*. 5, 15784 (2015)
- [44] Palmer, C. (2005). *Diffraction Grating Handbook*. *Journal of the Optical Society of America*, 46(1), 20–23.
- [45] Kress, B. C., & Meyrueis, P. (2009). *Applied Digital Optics*. *Applied Digital Optics*.
- [46] Glaser, T., Schröter, S., Bartelt, H., Fuchs, H.-J., & Kley, E.-B. (2002). Diffractive optical isolator made of high-efficiency dielectric gratings only. *Applied Optics*, 41(18), 3558.
- [47] Mateus, C. F. R., Huang, M. C. Y., Deng, Y., Neureuther, A. R., & Chang-Hasnain, C. J. (2004). Ultrabroadband Mirror Using Low-Index Cladded Subwavelength Grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(2), 518–520.
- [48] C. J. Chang-Hasnain, C. F. R. Mateus, and M. C. Y. Huang, “Ultra broadband mirror using subwavelength grating,” U.S. Patent 7,304,781 (Dec. 4, 2007).
- [49] A. Haglund, S. J. Gustavsson, J. Vukusic, P. Jedrasik, and A. Larsson, “High-power fundamental-mode and polarisation stabilised VCSELs using sub-wavelength surface grating,” *Electron. Lett.* 41(14), 805–807 (2005).
- [50] Chang-Hasnain, C. J., & Yang, W. (2012). High-contrast gratings for integrated optoelectronics. *Advances in Optics and Photonics*, 4(3), 379.
- [51] High Contrast Grating Solver Package, Univ. of California, Berkeley; <https://github.com/wjyangGithub/High-contrast-grating-solver>

- [52] Zhang, J., “Research on high-speed plasmonic metasurface modulator with electro-optic polymer,” The University of Tokyo, Doctor thesis
- [53] 藤村恵、細田康雄、勝村昌広、小林正規、北原弘昭、橋本和信、加園修、飯田哲哉、栗山和巳、横川文彦、”ドライエッチングプロセスによるナノパターン形状制御,” PIONEER R&D Vol.16, NO.2, 2006
- [54] 福谷貴史, “電気光学ポリマーを用いた垂直入射型光位相変調器の設計と試作,” 1 東京大学学士論文
- [55] Horie, Y., Arbabi, A., & Faraon, A. (2015). Guided resonance reflective phase shifters. In High Contrast Metastructures IV.
- [56] Horie, Yu, “Controlling the flow of light using high contrast metastructures,” California Institute of Technology Pasadena, California, Doctor thesis, 2017

## 発表

### Conference

- [1] **Makoto Ogasawara**, Yuji Kosugi, Jiaqi Zhang, Yuki Okamoto, Yoshio Mita, Akira Otomo, Yoshiaki Nakano and Takuo Tanemura, “Electro-optic polymer surface-normal modulator using silicon high-contrast grating resonator,” 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), JTH2A.48, San Jose, California, USA, May 2019.
- [2] Jiaqi Zhang , Yuji Kosugi, **Makoto Ogasawara**, Akira Otomo, Ya-Lun Ho, Jean-Jacques Delaunay, Yoshiaki Nakano, and Takuo Tanemura, “Metasurface optical modulator with electro-optic polymer,” Tsinghua University and University of Tokyo Joint Symposium, Beijing, China, May 2019.
- [3] Jiaqi Zhang, **Makoto Ogasawara**, Yuji Kosugi, Akira Otomo, Ya-Lun Ho, Jean-Jacques Delaunay, Yoshiaki Nakano, and Takuo Tanemura, “Metasurface optical modulator using electro-optic polymer,” International Symposium of Day of Light, Roppongi, June 2019.
- [4] Toshiki Miyazaki, **Makoto Ogasawara**, Jiaqi Zhang, Yoshiaki Nakano, and Takuo Tanemura, “Fabrication of High-Q Silicon Resonator for Surface-Normal Optical Modulator with Electro-Optic Polymer,” OPE workshop, Ikaho, April 2019.

### Journal

- [1] Jiaqi Zhang, Yuji Kosugi, **Makoto Ogasawara**, Akira Otomo, Toshiki Yamada, Ya-Lun Ho, Jean-Jacques Delaunay, Yoshiaki Nakano, and Takuo Tanemura, “Electrically tunable high-Q plasmonic metasurface perfect absorber at 1550 nm,” submitted to nano letters .
- [2]本論文の内容で論文を執筆中

### 本研究以外の発表

- [1]**小笠原誠**, 菅一輝, 種村拓夫, 中野義昭, “金属膜を用いた小型 InP 集積偏波ビームスプリッタの設計, ” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 湯河原, 2018年4月

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、大変多くの方にご支援いただきました。深く感謝いたします。

種村拓夫准教授には指導教員として、研究にかかわるあらゆる面において指導をしていただきました。疑問点や問題点が生じた際には、多くの有益なアドバイスをいただき、研究を進めていくことができました。自分では思いつかない視点からの意見を多数いただくことができ、大変感謝しています。さらに、対外発表や論文執筆の際にはとても丁寧に指導していただきました。

中野義昭教授には、本研究を行うための環境を提供していただきました。豊富なプロセス装置や光学測定装置なしでは、本研究は完遂できなかつたと思います。また、研究室内ミーティングにおいて鋭い指摘をいただけたことにも感謝しております。

杉山正和教授、渡辺健太郎特任講師には研究室内ミーティングにおいて、プロセスに関連して、新たな視点で問題点を解決する手法を紹介していただきました。

学術支援職員の加藤豪作氏には、実験装置の維持管理を中心として、滞りなく研究を進められる環境整備にご尽力いただきました。

国立研究開発法人情報通信研究機構の大友明上席研究員のグループには、本研究で用いたEOポリマーを提供していただき、EOポリマーについての知見を色々教えていただきました。

三田研究室の方々には、武田クリーンルームの管理者として主にプロセスに関して支援していただきました。学術支援専門職員の水島彩子氏には装置の使用に関しての指導を数多くしていただきました。宇佐美尚人氏、岡本有貴氏には使用装置についての有益なアドバイスを頂きました。

中野・杉山・種村研究室の方々には研究に関連することはもちろんのこと、日常生活においても多大な支援を頂きました。張家琦氏には、EOポリマーを扱った研究をする先輩として、使用装置や測定法についてのアドバイス及び指導を多くいただきました。卒業生の小杉優地氏には先行研究者として主にプロセスについての質問に丁寧に答えていただきました。宮崎俊輝氏、小野寺文太氏には同じ研究グループとして、サポートいただきました。浜松ホトニクス野本佳朗氏には共同研究者としてともに測定等を行っていただきました。また、同級生の田之村亮汰氏、福井太郎氏、小野塚章太氏には研究に関して幾度となくご協力いただき、日常生活でも様々な場面で助けていただきました。

その他、紙面の都合上ここには名前を挙げるのでできなかった皆様にも深く御礼申し上げます。

最後に私を応援し、見守ってくださった家族に深く感謝申し上げます。

2020年1月

小笠原 誠