

面外駆動型
Au ナノグレーティングによる
複屈折可変メタサーフェス

Birefringent reconfigurable metasurfaces
based on Au nanograting with out-of-plane actuation

平成30年度 博士論文

志村 崇

Takashi Shimura

東京農工大学 大学院工学府

機械システム工学専攻

2019年03月26日提出

Abstract

In this thesis, birefringent reconfigurable metasurfaces (BRM) at visible wavelengths were designed, fabricated, and demonstrated by combining an Au nanograting metasurface, which shows giant birefringence characteristics in visible light, and microelectromechanical system (MEMS) actuators.

The structural birefringence of an Au nanograting is determined from its dimensional parameters, including its pitch, slit width, and thickness. In this study, the reconfigurable birefringence was demonstrated by controlling the effective thickness of the Au nanograting.

Two MEMS actuators, electrothermal and electrostatic, were adopted to control the effective thickness by generating out-of-plane motion, which is an effective approach to obtain both of large displacement and resulting birefringence retardation change. From the theoretical analysis, birefringence retardation change up to 180° is predicted to be achievable at the wavelength range including of $0.46\ \mu\text{m}$, $0.53\ \mu\text{m}$, and $0.63\ \mu\text{m}$.

First, the BRM using electrostatic driving method was designed and fabricated. The fabricated device achieved, the change of birefringence retardation up to 25.3° (from 21.5° to 46.8°) at the wavelength of $0.633\ \mu\text{m}$ by applying voltage of from 0 to 200 V. In addition, the relationship between retardation and initial upward deformation induced by the internal stress of the released nanograting was investigated.

As the next approach, the BRM using electrothermal driving method was designed and fabricated. The four fabrication processes were devised and demonstrated, and then the optimal process which are breakage-free and bucking-free after releasing was established. By the device, the change of the birefringence retardation was achieved at the wavelength of $0.532\ \mu\text{m}$ by up to 7.6° (from 86.2° to 78.6°) by applying voltage in the range of 0–2.9 V.

As the result of these studies, the knowledge of metasurfaces with birefringence reconfigurable characteristics has been first obtained. From experimental demonstrations through multiple approaches, birefringent reconfigurable metasurfaces were demonstrated in visible light. Improvement points and next issues were also clarified to improve the range of the characteristics of the reconfigurable birefringence.

The BRM device presented in this study is expected to be incorporated into small and multi-functional display devices and non-invasive medical devices. This research shall contribute toward the expansion of the applications of metasurfaces in the visible light region.

目次

目次	v
1 序論	1
1.1 可視光の光制御技術	3
1.2 可変メタサーフェス	5
1.2.1 メタサーフェスから可変メタサーフェス	5
1.2.2 周囲媒質の屈折率変化を利用する可変メタサーフェス	6
1.2.3 機械的変形を利用する可変メタサーフェス	7
1.2.4 面外駆動と面内駆動	7
1.2.5 機械的変形を利用した可変メタサーフェスを利用した可視光制御 の現状	10
1.3 可変複屈折の用途と現状	11
1.4 本研究の目的	13
1.5 本論文の構成	13
2 複屈折可変メタサーフェスの原理と理論解析による検証	15
2.1 可変複屈折	15
2.1.1 複屈折	15
2.1.2 複屈折位相差	16
2.1.3 複屈折可変材料の種類と用途	17
2.2 Au ナノグレーティングの複屈折	20
2.2.1 Au ナノグレーティングの伝搬特性	21
2.2.2 Au ナノグレーティングの複屈折	22
2.3 面外駆動型 BRM による複屈折の変化	25
2.3.1 提案する BRM の原理	25
2.3.2 近似解析による複屈折可変特性の確認	25

2.4	本章のまとめ	29
3	実験的検証のための準備	31
3.1	面外駆動手法の概要	31
3.1.1	静電駆動方式による面外駆動のコンセプト	31
3.1.2	電熱駆動方式による面外駆動のコンセプト	32
3.2	本研究で利用した加工技術・観察手法	33
3.2.1	加工レートの導出手順	33
3.2.2	パターニング技術	34
3.2.3	成膜加工技術	36
3.2.4	除去加工技術	37
3.2.5	基板洗浄工技術	39
3.2.6	観察技術	41
3.2.7	光学特性の検証方法	41
3.3	本章のまとめ	45
4	静電駆動方式の面外駆動型 BRM	47
4.1	駆動手法の設計	47
4.1.1	静電駆動方式 BRM の駆動手法	47
4.1.2	変形量の解析	48
4.1.3	プルイン電圧の検証	51
4.1.4	動作周波数の解析	53
4.2	製作と評価	55
4.2.1	2次元グレーティングの3層近似理論計算による検証	55
4.2.2	製作	56
4.2.3	複屈折特性の評価	61
4.3	考察	65
4.4	本章のまとめ	68
5	電熱駆動方式の面外駆動型 BRM	71
5.1	駆動手法の設計	71
5.1.1	電熱駆動方式 BRM の駆動手法	71
5.1.2	変形量の解析	71
5.2	光学特性の解析的検証	75
5.2.1	誘電体層で生じる複屈折の検証	75

5.2.2	数値解析の導入	78
5.3	製作工程の設計	80
5.4	製作と評価 I (時間制御型)	82
5.4.1	数値解析による位相差変化量の見積もり	84
5.4.2	製作	85
5.4.3	光学特性の評価	87
5.4.4	製作工程 II に対する考察	89
5.5	製作と評価 II (成膜パターンニング型)	91
5.5.1	数値解析による位相差変化量の見積もり	93
5.5.2	製作	94
5.5.3	光学特性の評価	97
5.5.4	製作工程 II に対する考察	98
5.6	製作と評価 III (埋込パターンニング型)	100
5.6.1	数値解析による位相差変化量の見積もり	101
5.6.2	製作	101
5.6.3	光学特性の評価	105
5.6.4	透過率変化の検証	108
5.6.5	製作工程 III に対する考察	112
5.7	製作と評価 IV (保護膜パターンニング型)	113
5.7.1	数値解析による位相差変化量の見積もり	114
5.7.2	製作	117
5.7.3	光学特性の評価	122
5.7.4	製作工程 IV に対する考察	122
5.8	電熱駆動方式の考察	123
5.8.1	数値計算結果と測定結果の比較及び解析条件の考察	124
5.8.2	バイモルフ駆動に関する考察	125
5.8.3	静電駆動方式との比較	128
5.9	提案する BRM についての総括	131
5.10	本章のまとめ	133
6	結論	135
	謝辞	139
	参考文献	141

第1章

序論

現代社会には、iPhoneのようなスマートフォンやスマートウォッチなど、十数年前では夢物語とされるような電子機器があふれている。これらの電子機器の大きな特徴は、小型かつ多機能という点である。例えば、現在「携帯電話」は、ビデオ通話もゲームもでき、テレビが見られ、音楽が聴け、写真も撮ることができる。ひとたび画面をタップすれば、様々なSNSアプリケーションによって瞬時に世界中の人々と繋がることできる。このような夢のデバイスが片手に収まるサイズで実現されている背景の一端に、半導体製造を目的とした超微細加工技術の発展がある。デバイスを構成する各種半導体チップの小型化に加え、加速度センサを代表とするMEMS (Microelectromechanical systems) を小型化する技術、またそれらを集積化する技術が発展したことで、基板上に空間的余裕が発生し、機能を増やすことができるようになった。この小型・多機能化の波は、一般大衆向けの電子機器に留まらず、医療・産業、研究設備においても大きな恩恵をもたらしている。

このような近年の電子機器の動向に伴い、光デバイスの小型化が、新たな小型・多機能化にとって重要な課題となっている。カメラやディスプレイのような光デバイスで使用される光学素子は、一般に、結晶などの微細加工が困難な材料や、液晶などの一定以上の厚みを必要とする材料を用いている。そのため、現状の光学素子のさらなる小型化の見込みは薄く、光デバイスの小型化は限界に達しつつある。電子機器のさらなる小型・多機能化を実現するためには、光デバイスで使用される「光学素子の超小型・多機能化」を実現する新たなブレイクスルーが求められる。

光学素子の超小型・多機能化を牽引しうる選択肢として、同じく超微細加工技術の発展に伴って注目されているのが、「メタサーフェス」と呼ばれる2次元のメタマテリアルである。負の屈折率などの自然界の物質では実現できない特性が得られるとして、2000年頃から盛んに研究開発が行われるようになったメタマテリアルは、対象とする電磁波

の波長よりも小さい金属構造を 3 次元的に周期配置しなければならないため、特に可視波長では実現が困難であった。このメタアトムを 2 次元的に配置することで、特異な光学表面を得ることを目的としているのがメタサーフェスであり、表面構造であることから半導体加工技術と非常に相性が良い。そのため、近年の超微細加工技術の発展によって、近赤外や可視波長よりも小さいスケールの構造が実現できるようになり、多くの実験が報告されるようになった。

メタサーフェスの特性は、対象とする波長と表面構造の形状、周囲媒質の屈折率で決定される。特異な光学特性を、さらに外的制御で動的制御しようとする「可変メタサーフェス」の研究は、将来の光学デバイスの超小型・多機能化への有効なアプローチのひとつである。可視領域の光制御を可変メタサーフェスで実証する研究は、既に可変レンズや光スイッチングなどの様々な報告がなされている。しかしながら、ディスプレイの光強度制御やレーザーの偏光制御等に用いられる重要な光制御技術のひとつ、「可変複屈折」の報告例はない。既に広く普及している液晶を利用した複屈折可変素子は、価格や性能も安定しているが、製造工程や材料特性の点から、画素サイズ・厚み共に小型化の限界に到達しつつある。液晶に代わる新たな複屈折可変素子を実現できれば、将来の光学デバイスの超小型・多機能化に繋がる可能性がある。

そこで本研究では、可視光制御技術のひとつである可変複屈折を、可変メタサーフェスで実証することを試みた。本研究では、複屈折特性を有するメタサーフェスの一種である「Au ナノグレーティング」に着目した。大きな変化量を得るのに有効なアプローチである面外駆動を Au ナノグレーティングに適用し、解析と実験によって、複屈折の可変制御特性を検証した。

1.1 可視光の光制御技術

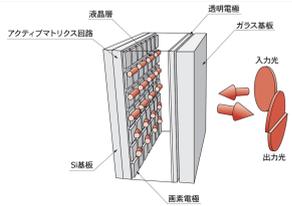
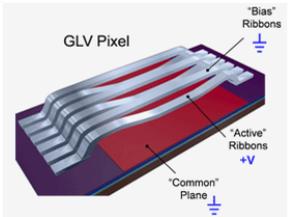
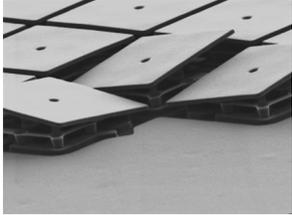
現在広く利用されている，主要な可視光制御技術を Table 1.1 にまとめた．これらの光学デバイスによる光制御技術は，レンズやミラーなどの光学素子を機械的・電氣的に駆動させて制御する手法や，結晶内の分子状態を外的に制御することで，光学素子の特性を制御する手法によって実用化されている．可視光制御技術の最も一般的な用途は，テレビやプロジェクタなどのディスプレイ技術だが，カメラや顕微鏡など，ヒトに視える光を扱う技術の需要は，挙げていけばきりが無い．

DMD (Digital Mirror Device) や LCOS (Liquid Crystal on Silicon)-SLM (Spatial Light Modulator)¹は，素子(画素)を平面上にアレイ化した状態でデバイス化されている．このようなデバイスは，光の空間的な分布を制御することができるため，総じて空間光変調器 (SLM) と呼ばれることもある．

これらのデバイスは既に十分に小型化されているが，例えば GLV(Grating Light Valve) や DMD のようなミラーを扱う反射型デバイスの場合，素子と光源とを集積することができない等，光学系の制約により小型化が制限される．また，可変焦点レンズや LCOS-SLM は，光学結晶や液晶を利用しているため，一定以上の厚みが必要で，かつ微細加工が困難であるといった制約がある．このように，実用化されている可視光制御デバイスの小型化は，既に限界に近付きつつある．したがって，もしもこれらのデバイスを超えるような超小型デバイスを実現することができれば，将来の超小型・多機能光学デバイスへのブレイクスルーとなる可能性がある．

¹LCOS-SLM は反射型．透過型の液晶 SLM は LC-SLM(Liquid Crystal Spatial Light Modulator)

Table 1.1: 実用化されている主要な可視光制御技術

概要	主な用途	代表的な製品
可変焦点レンズ		
レンズの位置や形状を機械的・電氣的に制御して焦点を調整	ズームレンズ	 フォーカスチューナブルレンズ (シグマ光機)[1]
空間光変調器		
電圧で光学結晶の分極や液晶の配向を変化させて偏光を制御	ディスプレイ, 波面制御, 偏光操作	 LCOS-SLM (浜松ホトニクス)[2]
可変回折格子		
静電引力でミラーの高さを制御	スイッチング, ディスプレイ	 GLV (Silicon Light Machines)[3]
MEMS ミラー, DMD		
静電引力でミラーの傾きを制御	スイッチング, プロジェクタ	 DMD (Texas Instruments)[4]

1.2 可変メタサーフェス

1.2.1 メタサーフェスから可変メタサーフェス

波長よりも小さい構造を周期的に配置することで、特異な光学特性を発現する人工的な表面構造のことをメタサーフェス (metasurface) という。構造によって光学特性をデザインでき、自然界には存在しないような光学表面を実現できるため、多様な目的で様々な研究が報告されている [5]。メタサーフェスを構成する周期構造の単位要素はメタアトム (meta-atom) とも称され、C 型リング [6] やナノロッド [7] などが代表的である (Fig. 1.1)。

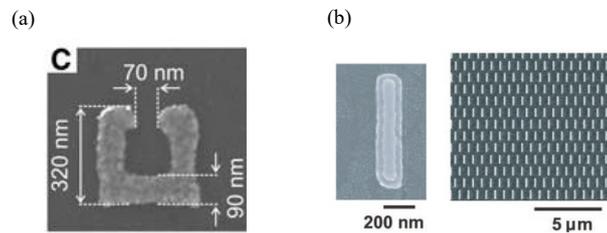


Figure 1.1: メタサーフェスを構成する代表的な単位要素. (a) C 型リング [6]. (b) ナノロッド [7].

これらの単位構造は主に金属で製作されており、金属中あるいは金属表面の自由電子と入射光との共鳴現象によって、対象とする波長のエネルギーを吸収・散乱させる等の光学現象が発生するように設計される。メタサーフェスには、このメタアトム単体の特性を利用したもの、隣り合うメタアトム間の相互作用を利用したものがある。前者は、メタアトムそのものの寸法や角度を変えることで、メタアトム内で生じる共鳴現象を調整している。対して後者では、隣り合うメタアトムの近接場相互作用を利用しており、その距離を調整することで共鳴状態を変化させ、光学特性を制御することができる。

メタアトムのサイズは対象とする波長よりも小さくする必要があるのであるため、加工難度の点から、対象の波長が長波長であるほど実現しやすい。そのため、メタサーフェスの用途は、赤外線や電波などが主流であった [8, 11 章など], [9]。しかしながら、半導体加工を目的とした近年の超微細加工技術の発展により、サブミクロン～ナノスケールの加工が普及した。加えて、メタサーフェスは表面構造であることから、リソグラフィや成膜などの半導体加工技術との親和性が高く、可視光を対象とした単位要素の製作が実現できるようになった。既に、カラーフィルタ [10, 11] だけではなく、Fig. 1.2 に示すようなカラーのホログラフィ [12, 13, 14] や、不可視化 (カーペットクローク) の実証も報告

されている [15, 16].

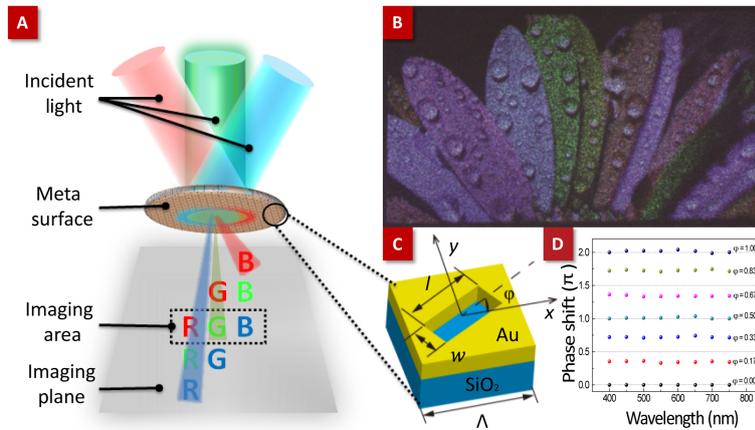


Figure 1.2: ナノ開口メタサーフェスを用いたカラーホログラフィ [14]

メタサーフェスで生じる特性は構造に依存しているため、一旦製作されたメタサーフェス素子の光学特性は、基本的に固定となる。もし、メタサーフェスの特異な光学現象を動的に制御することができれば、応用の幅を大きく広げることができる。外的制御で特性を動的に制御しようと試みる研究は、様々な報告がなされている [17]。現在報告されている光制御方法は、周囲媒質の屈折率変化を使う例と、メタサーフェスそのものを機械的変形させる例との2つに大別できる。以下にそれぞれの具体例を示す。

1.2.2 周囲媒質の屈折率変化を利用する可変メタサーフェス

メタサーフェスの動的制御の多くは、微細構造をとりまく周囲媒質の屈折率を変化させ、共鳴波長をシフトさせるという原理に基づいている (Fig. 1.3)。周囲媒質として、光学活性ポリマー [18]、相変化材料 [19, 20]、電解液 (可逆電気めっき) [21]、導電性酸化物 [22, 23]、液晶 [24] などの物質が利用されている。

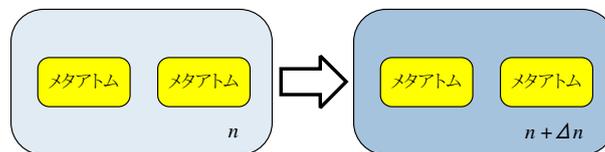


Figure 1.3: 周囲媒質の屈折率変化を利用する制御手法の概要 [25]

これらの手法は、従来のメタサーフェスをほぼそのまま利用できる一方、特殊な媒質を用いたり、外的環境を用意する必要がある。また、一番の課題として、大きな屈折率

変化を得にくいという特徴がある。変化量は媒質の特性に大きく依存しているため、変化量を大きく確保するには、別途工夫が必要となる。

1.2.3 機械的変形を利用する可変メタサーフェス

2006年頃より、新たなアプローチとして、メタサーフェスそのものを機械的に変形させる研究が報告されるようになった。1.2.1項で述べたように、メタサーフェスの光学特性は、隣り合うメタアトム間の距離の影響を受ける (Fig. 1.4)。そのため、機械的変形を利用することは、変化量を大きく確保するのに有効なアプローチである [25]。

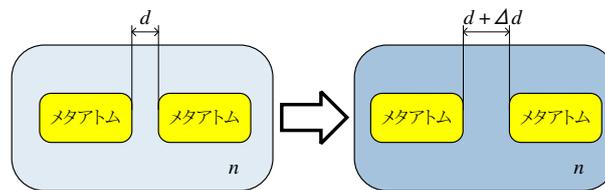


Figure 1.4: 機械的変形を利用する光制御手法の概要 [25]

機械的変形は、ポリジメチルシロキサン (PDMS) のような伸縮可能な基板上にメタサーフェスを製作することによって実証する研究 [26, 27, 28] をはじめとして、近年では、加工技術の進展等によりメタサーフェスと MEMS アクチュエータとを融合する研究も多く報告されるようになった。機械的な可変メタサーフェスの研究例として、可変透過率 [29, 30, 31, 32, 33, 34], 偏光制御 [35, 36], カラーフィルタ [29, 37, 38, 39, 40], 可変レンズ [41], 可変回折格子 [42, 43, 44], 光位相制御 [45, 46] などが報告されている。

1.2.4 面外駆動と面内駆動

前々項で述べたように、可変メタサーフェスの光制御手法には2つのアプローチに大別されるが、本研究では、より大きな変化量が期待できる、機械的変形の利用に着目した。機械的変形を利用する手法は、面内駆動型と面外駆動型に分けられる。いずれも、メタアトム間の距離を調節することで光学特性を制御することをコンセプトとしている。それぞれの研究例と、長所・短所について述べる。

Fig. 1.5 に、面内駆動型メタサーフェスの研究例を示す [41]。山口らは、Au のサブ波長グレーティングの面内駆動によって動作する可変レンズを報告している。この研究例のように、MEMS を利用する場合は、メタアトムで構成された梁構造を静電引力で引き合わせる手法が多く報告されている。本間、高橋らは、Al ナノワイヤで構成されたグレーティングのスリット幅を、ワイヤ同士の静電引力または楕歯型アクチュエータを

用いて制御することにより，可変カラーフィルタを実証した [37, 39, 40]. Zheludev らのグループは，ジグザグ梁構造を有したグレーティングを，梁同士の静電引力で駆動して，近赤外での光スイッチングに成功した [31].

メタアトムの距離依存性は，遠くなっても指数関数的に変化するものが多い．また，水平に駆動するため，他のデバイスと集積させる場合，機械的な干渉を考慮しなくてよいのがメリットである．ただし，プルインやスティッキングの恐れがあるため，初期の間隔の 1/3 以下の機械的変形量に留める必要があり，結果として大きな機械的変形量を得にくい場合がある．間隔を広げる方向に駆動させる工夫をすることも可能だが，同じ理由で限界がある．

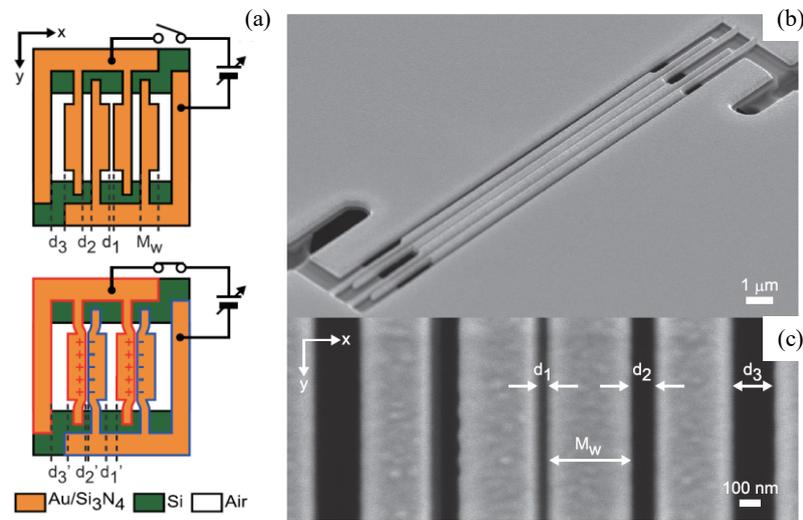


Figure 1.5: 面内駆動型の可変メタサーフェスを利用した可変レンズの研究例 [41]. (a) 可変レンズの概略図．静電駆動で Au ナノスリットの幅を制御することで，焦点距離が変化する．(b), (c) 製作された可変レンズの SEM 観察像．(b) 全体像，(c) スリットの拡大図．

Fig. 1.6 に，面外駆動型メタサーフェスの研究例を示す [30, 47]. 異種材料の多層構造であるバイモルフ梁に温度変化を与えることで，面外方向に駆動させる手法が，Zheludev らのグループより提案された．この梁には C 型リングのメタアトムが配置されており，面外駆動によるメタアトム間の距離の変化によって近赤外の透過率ピーク制御を実証している．さらに，電流による通電加熱と，磁場によるローレンツ力を併用することで，動作周波数を拡大する研究も報告している [32]. また，Isozaki らは，らせん構造を静電引力や圧力で引っ張り上げる手法により，テラヘルツ帯の偏光制御を実証した [35, 36].

面外駆動型は，構造が上下に動くため，メタサーフェス上下に存在する構造との干渉

に注意しなければならない。しかし、上下の干渉に気を付けさえすれば、構造周期などの初期形状に縛られることなく、変形量を大きく確保することができる。

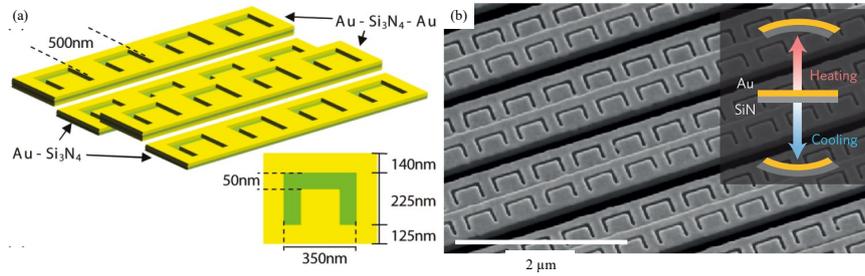


Figure 1.6: 面外駆動型の可変メタサーフェス (RPM: reconfigurable photonic metamaterials) を利用した近赤外の透過率制御の研究例 [30, 47]. (a) C型リングが配置されたバイモルフ梁の概略図. (b) 製作されたRPMのSEM観察像. 挿入図は、バイモルフアクチュエータの長手方向の断面概略図で、温度変化による梁の湾曲を示している.

1.2.5 機械的変形を利用した可変メタサーフェスを利用した可視光制御の現状

Table 1.2 に、現在報告されている機械的変形を利用した可変メタサーフェスと、主要な可視光制御技術との対応をまとめた。光スイッチングや可変レンズなど、主要な可視光制御技術に対応する機械的変形メタサーフェスが、既に報告されている。さらに、可変カラーフィルタなどの実用化されていない技術を実証している例も存在する。このように機械的変形を利用した可変メタサーフェスは、現在の光制御技術の代替、あるいはより高度で多機能な制御手法となる可能性がある。しかしながら、機械的変形メタサーフェスでは実現できていない項目がいくつか存在する。そのひとつが、ディスプレイ素子の光強度制御やレーザーの偏光制御等に用いられている「可変複屈折」である。

Table 1.2: 機械的変形を利用した可変メタサーフェスと主要な可視光制御技術との対応

制御タイプ	主な用途	実用化されている技術	報告例	(参考) 近赤外～テラヘルツ領域での報告例
可変レンズ	カメラ, 顕微鏡	あり	[41]	-
可変カラーフィルタ	ディスプレイ	なし (現状は 3 色用意して切替)	[37, 38, 39, 40]	-
光スイッチング	プロジェクタ, 各種光学系	DMD, GLV	-	[31]
光強度制御	ディスプレイ, ホログラフィ, フィルタリング	液晶光変調器, DMD	[32, 34]	[29, 30, 31, 33]
可変複屈折	偏光操作, 光強度制御	液晶素子, 電気光学結晶	-	[46]
光学活性制御	偏光操作	-	-	[35, 36]
可変回折格子	ディスプレイ, 各種光学系	GLV	-	[42, 22]
光位相制御	ホログラフィ	液晶素子	[44, 45]	[22, 46]

※可視光領域は 0.4 μm ~ 0.8 μm

1.3 可変複屈折の用途と現状

可変複屈折は、ディスプレイ素子の光強度制御やレーザの偏光制御等に用いられる重要な技術である。複屈折とは、入射光の振動方向によって異なる屈折率を示す状態のことで、方解石を代表する光学結晶等を光が透過する際に見られる物理現象である。この複屈折を外的要因で変化させることで、光の偏光状態を制御できるようになり、光強度制御などに応用されている。現在実用化されているデバイスには、可変複屈折特性を有する液晶、あるいは電気光学結晶が利用されている。液晶は、数 μm の厚みを必要とし、また製造工程の面から小型化の限界に到達しつつある [48, p.115]。また、電気光学結晶は、結晶であることから超微細加工との相性が悪く、小型化には向いていない。

複屈折可変素子のさらなる小型化は、裸眼による立体的かつリアルタイム表示が可能な電子ホログラフィを代表とする、新たなディスプレイ技術の実現に繋がることが期待されている。可変複屈折とは異なるが、屈折率変化を利用して偏光を制御する素子が報告されている (Fig. 1.7 A~C)。これらの素子は、光学活性ポリマー [18] や磁気光学効果 [49, 50] による非変形の光制御を利用しているため、厚さや素子面積が非常に小さいというメリットがあり、リアルタイムホログラフィ等への応用が期待されている。しかしながら、非変形タイプの光制御素子は、総じて変化量が小さく、また材料も特殊なため、実用化へのハードルは未だ高いままである。

複屈折は、人工的に作られた微細構造によっても発現し²、メタサーフェスの分野でもいくつかの研究が報告されている [52, 53, 54, 55]。その中でも、本研究では、Auのラインアンドスペースで構成される「Au ナノグレーティング」に着目した (Fig. 1.7 D)。Au ナノグレーティングは、可視光領域で大きな複屈折を生じることが報告されており [52, 51]、寸法を調節することによって、厚さ $1 \mu\text{m}$ 未満で有意な複屈折を得られることが実証されている [56, 57]。この Au ナノグレーティングを機械的に変形させることができれば、複屈折可変メタサーフェスを実現できる可能性がある。

²構造的複屈折

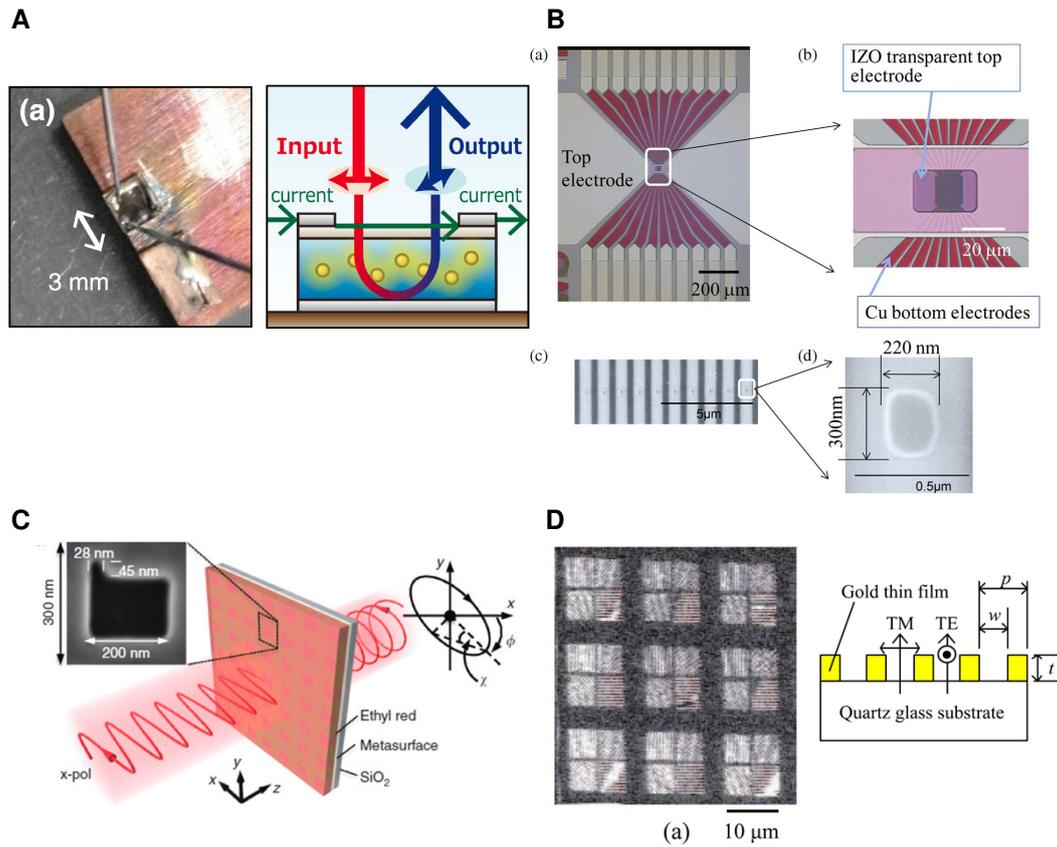


Figure 1.7: 偏光を制御する素子の研究例 (ABC) と Au ナノグレーティング (D). **A** 窒素ドープした酸化亜鉛単結晶の磁気光学効果を利用した偏光回転素子 [50]. **B** スピン注入磁化反転による磁気光学効果を利用した空間光変調器 [49]. **C** 光学活性ポリマーの屈折率変化を利用した偏光回転素子 [18]. **D** Au ナノグレーティング [51].

1.4 本研究の目的

光スイッチングや可変レンズなど、現在の主要な可視光制御技術に対応する機械的変形メタサーフェスの研究が多数報告されており、さらに、可変カラーフィルタなどの実用化されていない技術を実証している例も存在する。このように機械的変形を利用したメタサーフェスは、現在の光制御技術の代替、あるいはより高度で多機能な制御手法を提供する可能性を有している。しかしながら、ディスプレイの光強度制御やレーザの偏光制御に用いられている可変複屈折については、可視光領域では報告されていない。

本研究では、可変複屈折を機械的変形メタサーフェスで実証することを試みた。被変形構造として、メタサーフェスの一種である Au ナノグレーティングに着目した。Au ナノグレーティングは、可視域で大きな複屈折を生じることが報告されており、寸法を調節することにより、厚さ 1 μm 未満で有意な複屈折を得られることが実証されている。この Au ナノグレーティングに、大きな変化量を得るのに有効なアプローチである「面外駆動」を適用することで、複屈折可変メタサーフェスが実現できると考え、理論及び数値解析による検証と、試作による実験的な検証を行った。グレーティングそのものを面外駆動させる研究は、光通信等の赤外応用の目的で Zheludev グループにおいていくつかの実証例があり [30, 47]、検証のアプローチのひとつとして有意と考えられる。

本研究の目的をまとめると、以下の通りである。

- Au ナノグレーティングを面外駆動させる手法を確立すること。
- 可視光領域で利用可能な複屈折可変メタサーフェスを実証すること。

また、これ以降、本研究で提案する複屈折可変メタサーフェスを BRM (Birefringent Reconfigurable Metasurfaces) と呼称する。

1.5 本論文の構成

本論文では、面外駆動型 BRM の設計・製作及び複屈折可変特性について、解析と実験の点から述べる。まず、第 2 章で、提案する複屈折可変 BRM の原理と、理論解析による検証について述べる。第 3 章では、BRM の実験的検証のコンセプトについて述べ、実験のための準備として、利用した加工技術及び光学特性評価手法について述べる。第 4, 5 章では、実験的検証のための手法として提案する 2 方式の BRM の試作と、複屈折可変特性の測定について述べる。最後に、本論文の成果を第 6 章でまとめる。

第2章

複屈折可変メタサーフェスの原理と理論解析による 検証

本章では、本研究の目的である複屈折可変メタサーフェス (BRM) の原理と、理論的な解析による検証について述べる。まず、本研究で扱う複屈折という現象について説明し、Au ナノグレーティングの特性を具体的に述べる。続いて、本論文で提案する BRM の複屈折変化の詳細を述べ、理論的な解析によってその可変特性を検証する。

2.1 可変複屈折

2.1.1 複屈折

光学的に異方性のない物質の屈折率は、入射光の振動方向によらず一定である。振動方向によって屈折率が異なる物性を「複屈折」といい、複屈折特性を持っている材料を「複屈折材料」という。光学の教科書で紹介されている複屈折材料として、「方解石」が挙げられる。方解石は、透過率の高い材料であるが、Fig. 2.1 のように透過してきた像が2つに分かれて見える。この現象は、光の方向によって屈折率が異なり、複数の光路が存在していることによるもので、複屈折材料特性の有名な一例である。

複屈折特性を有する材料の代表例は、光学結晶の一種である水晶やフッ化マグネシウムなどがある。これらの材料は、結晶の異方性によって複屈折を発現する。複屈折は、物質の光学的な異方性によって生じるため、結晶構造の他に、分子の配向などによっても発現する。分子配向により複屈折特性を示す最も有名な材料が液晶である。身近な材料では、セロハンテープも分子配向による複屈折特性を示すことが知られており、偏光スタンドグラスなどの実験工作に利用される。

また、光学的な異方性は、波長よりも十分に小さい構造であれば、分子や結晶よりもずっと大きなスケールにおいても生じる。このような、構造の異方性によって発現する



Figure 2.1: 方解石を透過した像が2つに分かれて見える，複屈折特性によって生じる有名な現象のひとつ．方解石は，炭酸カルシウムの結晶体．

複屈折を「構造的複屈折」という．近年のナノインプリントなどの微細加工技術を利用して量産できるスケールの表面構造で実現できるため，人工の複屈折材料として利用されている．

2.1.2 複屈折位相差

複屈折材料を透過する光は，方向によって光の進む速さが異なる¹．すなわち，ある2方向の光成分の位相を「ずらす」ことが可能となる．複屈折によって生じた光学位相差を「複屈折位相差」という．

屈折率が最も大きい方向の軸を遅相軸 (Slow axis)，それに対して垂直な方向を進相軸 (Fast axis) と定義する．遅相軸の屈折率を n_e ，進相軸の屈折率を n_o とした時²，複屈折位相差 δ は次の式で表される [58, pp. 340-341]．

$$\delta(t) = \frac{2\pi t}{\lambda} \Delta n = \frac{2\pi t}{\lambda} \left| \operatorname{Re}[n_e] - \operatorname{Re}[n_o] \right| \quad (2.1)$$

ここで， t は複屈折材料の厚さ， λ は入射光波長， Δn は複屈折量である．式 2.1 で示すように，複屈折位相差 δ は材料の厚さ t で調節することができる³．用途に合わせて複屈折位相差を調整した光学素子である「波長板」は，偏光を扱う光学系では欠かすことので

¹本研究における光の「速さ」は，基本的に位相速度のことを指す．

²e は extraordinary，o は ordinary の頭文字．

³ただし，一般的には $n_o \simeq n_e$ の場合が多い．そのためか，遅相軸を複屈折素子の光軸とする文献も多い．

きない重要な光学素子である。一般に、複屈折性を有する光学結晶の厚さの調節や、異なる複屈折特性材料を貼り合わせるなどの作業によって、調整されている。この位相差を 180 度、すなわち振動周期の半分となるように調整した素子は 1/2 波長板と呼ばれる。1/2 波長板は、進相軸を中心に偏光状態を線対称に変換することができるため、光強度制御などに利用される⁴。また、90 度となるように調整した素子は 1/4 波長板と呼ばれる。1/4 波長板は、直線偏光を円偏光に、また円偏光を直線偏光に変換できる。この性質を利用して、不要な戻り反射などを取り除く光アイソレータ等の用途で利用される。

2.1.3 複屈折可変材料の種類と用途

複屈折を有する物質には、外部因子によって複屈折特性が変化するものが存在する。現在実用化されている複屈折可変材料を Table 2.1 にまとめた。液晶は、電圧印加により分子が再配列され、光学異方性が変化することで、屈折率変化が生じる。この性質を実用化するために様々な研究開発が行われ、現在では液晶ディスプレイ等の用途で広く利用されている。ニオブ酸リチウム等の結晶は、水晶と同じく結晶の光学異方性により複屈折が生じるが、電圧をかけると電子分極が生じて屈折率が変化する性質を有する。このような結晶は、電気光学結晶と呼ばれる。電圧印加による屈折率変化を電気光学効果といい、電界強度に比例する項を Pockels 効果という。電気光学効果は水晶でも微量に生じるが、電気光学結晶と呼ばれる材料は、その 10 倍以上の一次電気光学係数を有する。電気光学結晶を用いた変調器も既に実用化されており、レーザー制御などに利用されている。

これらの既に実用化されている複屈折可変素子は、価格や性能も安定しているが、主に製造工程の点から、画素サイズ・厚み共に小型化の限界に到達しつつある。その理由の一端として、液晶や結晶を用いる素子は一定以上の厚みが必要であることに加え、パターンニングなどの超微細加工との相性が悪いという点が挙げられる。したがって、将来の光学デバイスのさらなる小型化を目指す場合、何らかのブレイクスルーが必要になる。

複屈折可変素子を利用した光強度制御

可変複屈折の用途で最も身近な例は、ディスプレイ素子の光強度制御である。その一例である垂直配向 (VA: Vertical Alignment) モードの液晶ディスプレイ素子の光強度制御の原理を、Fig. 2.2 の光学系を用いて説明する。2 枚の偏光板を、光軸を 90 度ずらし

⁴例えば進相軸に対して 45 度傾いた直線偏光を入射すると、直線偏光は 90 度回転して出射される。この性質を利用し、光軸が 90 度ずれた 2 枚の偏光板の間に 1/2 波長板を入れることで、光強度の明暗を調整する光学系を組むことができる

Table 2.1: 実用化されている複屈折可変材料

複屈折可変材料	代表例	代表製品の帯域
液晶	ネマチック液晶	0.4~1.55 μm (LCOS-SLM, 浜松ホトニクス [2])
電気光学結晶	LiNbO ₃	0.4~1.65 μm (電気光学変調器, Thorlabs[59])

て配置した状態をクロスニコルという。偏光板は、自身の光軸に垂直な偏光を遮断する性質があるので、クロスニコル状態の光学系は透過率が低い状態となる。この 2 枚の偏光板 P, A の間に、複屈折位相差 δ を変化させることができる複屈折可変素子 X を配置する。入射光側の偏光板 P の光軸を角度 90° に設定し、複屈折可変素子 X の進相軸の傾きを α とした時、理想的な透過率 T は次の式で求めることができる [60]⁵。

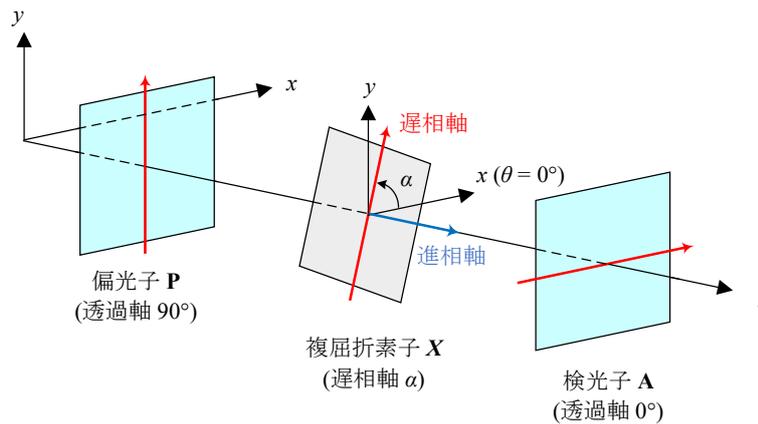


Figure 2.2: 複屈折可変素子を利用した光強度制御の光学系の概略図。

$$T = \sin^2(2\alpha) \cdot \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (2.2)$$

複屈折可変素子 X の進相軸の傾き α を 45° で固定すると、式 (2.2) 中の $\sin^2(2\alpha)$ は 1 となるため、変数は δ のみとなる。これより、複屈折可変素子で発生する位相差 δ を変化させることによって、透過率が変化することがわかる。透過率は $\delta = 0$ の時に最小となり、 $\delta = \pi$ の時に最大となるため、複屈折位相差の増減によって光強度の明暗を切換えることができる。

⁵あるいは [48, p.90] など。

この原理は、他の複屈折可変素子を利用した光学系にも適用することができる。位相差の変化域は $0 \sim \pi$ にする必要はあるが、初期位相差が 0 に調節できない場合でも、補償板 (位相子) 等を利用して初期位相差をオフセットすればよい [61]。例えば、初期位相差 δ_0 、補償板で生じる位相差 δ_{offset} とした時、 $\delta_0 + \delta_{\text{offset}} = 2n\pi$ (n は整数) となるように補償板で調整し、外部入力によって $\delta_0 \sim (\delta_0 + \pi)$ まで位相差を変化させればよい。この位相差変化に必要な電圧が「半波長電圧 (V_π)」である。

2.2 Au ナノグレーティングの複屈折

本研究で着目するメタサーフェスの一種である，Au ナノグレーティングの複屈折特性について述べる．Fig. 2.3 に Au ナノグレーティングの概略図を示す．Au ナノグレーティングは，石英ガラス状に配置された，サブ波長スケールの金属の周期構造で構成される．周期構造の寸法を適切に設定することで，可視光に対して大きな複屈折特性を示すことが報告されている [52]．この複屈折性は偏光方向による伝搬特性の違いに由来するものである．垂直入射の場合，入射面⁶を定義することができないため，グレーティングのスリットを基準として，偏光方向を定義する．スリットに平行な偏光 (スリットに平行な界面と電場が平行になる偏光) を TE (Transverse Electric) 偏光，スリットに垂直な偏光 (スリットに平行な界面と磁場が平行になる偏光) を TM (Transverse Magnetic) 偏光と定義する⁷．この偏光方向の定義を図示すると，Fig. 2.3 (a) のようになる．

Au ナノグレーティングの横断面図を Fig. 2.3 (b) に示す．図中において， p は構造の周期， w はスリット幅， t はグレーティング構造の厚さを指す．Au ナノグレーティングの複屈折特性は，主にこの 3 つの寸法パラメータで制御することができる．次項では，金属ナノグレーティング中を伝搬する TE・TM 偏光それぞれの伝搬特性について述べる．

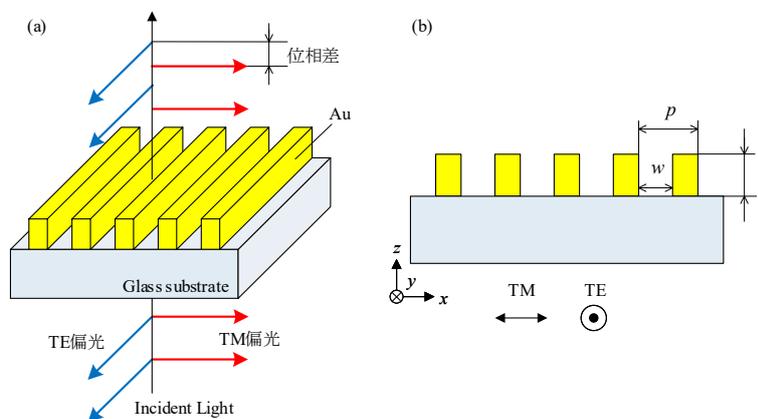


Figure 2.3: Au ナノグレーティングの概略図．(a) 偏光方向の定義．(b) Au ナノグレーティングの横断面形状．

⁶入射光と反射光の伝播方向を示すベクトル (及び反射する表面の法線ベクトル) で決まる平面のこと．

⁷一般的に TE・TM 方向は，入射面に対して電場の振動方向が平行か垂直かで定義される．

2.2.1 Au ナノグレーティングの伝搬特性

Au ナノグレーティングの伝搬特性は、誘電体 (空気を含む) を金属で挟んだMIM(metal-insulator-metal) 構造から構成される無限長の単スリット (Fig. 2.4) の伝播特性が適用できることがわかっている [57].

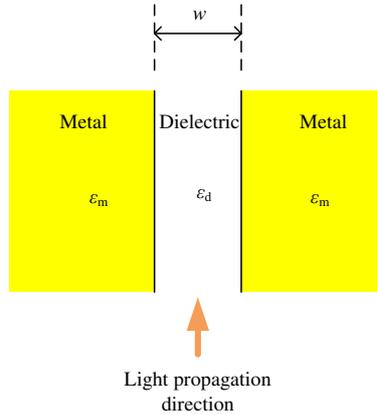


Figure 2.4: 金属単スリットのモデル図.

TE 偏光の伝搬特性

誘電体を金属で挟んだ MIM 構造中を伝搬する光のうち、金属面に平行な方向に電場振動する TE 偏光の透過は TE モードと呼ばれる伝搬モードで表現される。まず、金属を完全導体⁸(Perfect electric conductor: PEC) であると仮定して内部の光の伝搬を考える。PEC の場合、金属表面の電場は完全に打ち消されて 0 となることから、金属表面で打ち消しあう 2 つの光の合成波のみが、単スリットを進むことができる。スリット幅 w の無限に長い金属単スリットを光が伝搬すると仮定すると、構造中を伝搬する TE モードの伝搬定数 k_{TE} は、幾何学的な考察によって⁹以下の式から求めることができる。

$$k_{TE} = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\pi}{w}\right)^2} \quad (2.3)$$

ただし、 k_0 は真空中の光の伝搬定数である。この式から、 k_{TE} は k_0 より小さくなることがわかる。また、伝搬定数は w に大きく依存することがわかる。 $w < \lambda/2$ の場合は k_{TE} が虚数となり、進行波が存在しない。これは、光がスリット中を伝搬せずに全て反

⁸電気抵抗がない導体のこと。完全導体では、導体中の自由電子が入射電場の振動に対して十分速く運動することができる。

⁹平行平板あるいは方形導波管の管内波長を、解析的ではなく物理的考察によって導出する手法。例えば、西原著の『光・電磁波工学』[62] 等が参考になる。

射することを意味している。この現象は「カットオフ」と呼ばれ、 $w = \lambda/2$ となる時の λ がカットオフ波長である。カットオフ現象を利用し、 $w \ll \lambda/2$ で金属線を配置することで TE 偏光を消光する手法を用いているのが、ワイヤーグリッド偏光子である。

次に、実在の金属の場合の伝搬について考える。実際の金属は完全導体ではなく抵抗が存在するので、自由電子が外部から加わる電場振動に完全に追従できない。そのため、電場が金属中に“浸み込み”，一部のエネルギーが熱に変換されて吸収される。特に可視光領域では光の周波数が大きく、より電子が追従しにくい状態となるため、この浸み込みの深さ¹⁰を考慮する必要がある。浸み込み深さは入射光の周波数に対する金属の複素誘電関数から決定する。これを考慮したときの TE モードの伝搬定数 k_{TE} は、以下の方程式の解として与えられる [63].

$$\tan\left(\sqrt{k_0^2 \varepsilon_d - k_{\text{TE}}^2} w/2\right) = \frac{\sqrt{k_{\text{TE}}^2 - k_0^2 \varepsilon_m}}{\sqrt{k_0^2 \varepsilon_d - k_{\text{TE}}^2}} \quad (2.4)$$

ただし、 ε_d は金属間の誘電体の複素誘電率、 ε_m は金属の複素誘電率を示している。浸み込みを考慮したことにより、カットオフが生じる寸法 w は、完全導体の時よりも小さくなる¹¹。本研究では、電場の浸み込みを考慮した式 (2.4) を利用した。

TM 偏光の伝搬特性

MIM 構造の金属面に垂直な方向に電場が振動する TM 偏光では、TE 偏光とは異なる伝搬特性を示す。金属の面外方向に加えられる外部電場の振動によって金属表面に自由電子の疎密が生じ、金属-誘電体界面で表面プラズモンが励起される。無限長単スリット中を光が伝搬すると仮定するとき、光の伝搬定数 k_{TM} は以下の方程式の解として与えられる [64, 65].

$$\tanh\left(\sqrt{k_{\text{TM}}^2 - k_0^2} w/2\right) = \frac{-\sqrt{k_{\text{TM}}^2 - \varepsilon_m k_0^2}}{\varepsilon_m \sqrt{k_{\text{TM}}^2 - k_0^2}} \quad (2.5)$$

この式より、伝搬定数が真空中の伝搬定数 k_0 よりも大きくなる

2.2.2 Au ナノグレーティングの複屈折

前述のように、Au ナノグレーティングは、TE 方向では伝搬定数が真空中より小さくなり、TM 方向では伝搬定数が大きくなるという、逆方向の特性が得られる。式 (2.4),

¹⁰あるいは表皮深さなどと表現される。

¹¹ざっくりと表現すると、浸み込んだ分だけ実効的なスリット幅が広がっていると考えることもできる。

(2.5) は、単スリットを並べた構造ともいえる Au ナノグレーティングにも概ね適用可能であることが分かっている [57]. 屈折率 n の物質中の伝搬定数 k の関係式 $k = nk_0$ より、Au ナノグレーティングの TE・TM 方向それぞれの実効的な屈折率 n_{TE}, n_{TM} を理論的に導出することができる. したがって、これらの実効屈折率を式 (2.1) に代入した次式より、複屈折位相差 δ の理論値を算出することができる.

$$\delta(t) = \frac{2\pi t}{\lambda} \Delta n = \frac{2\pi t}{\lambda} \left| \text{Re}[n_{TM}] - \text{Re}[n_{TE}] \right| = \frac{2\pi t}{\lambda} \left| \frac{\text{Re}[k_{TM}]}{k_0} - \frac{\text{Re}[k_{TE}]}{k_0} \right| \quad (2.6)$$

Fig. 2.5 に、波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ における Au ナノグレーティングの実効屈折率の計算結果を示す. Au の物性値は Palik の文献値を用いた [66]. TE 偏光の実効屈折率は、スリット幅が小さくなるにつれて減少し、スリット幅 $0.25 \mu\text{m}$ 付近で急激に小さくなる. この急激な減少の終端が、浸み込みを考慮した時のカットオフ幅と考えられる. スリット幅 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 付近の複屈折量 $\Delta n = |\text{Re}[n_{TM}] - \text{Re}[n_{TE}]|$ は、およそ $0.6 \sim 1.0$ の値が得られることがわかる. 複屈折量は、方解石で 0.17 (波長 $0.643 \mu\text{m}$) [67] のため、同じ複屈折位相差を得ようとした場合、Au ナノグレーティングであれば方解石の半分以下の厚みで実現できると見積もられる¹².

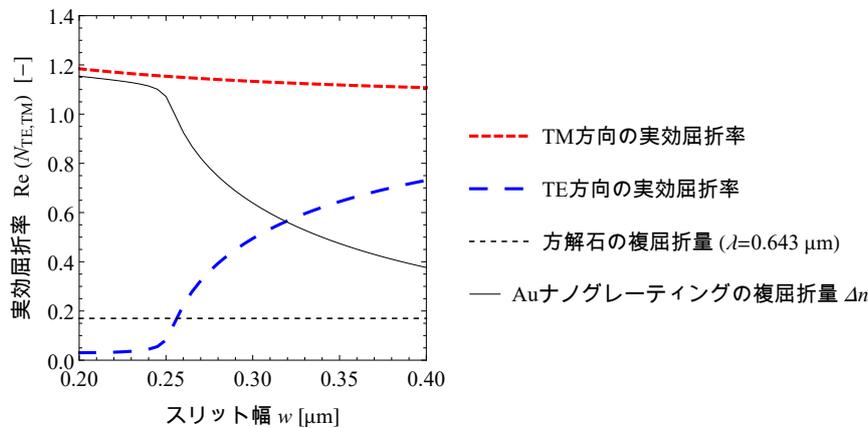


Figure 2.5: 波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ における Au ナノグレーティングの実効屈折率の理論計算結果.

例えば、Au グレーティングの厚み t を $0.3 \mu\text{m}$ に設定した場合、複屈折位相差は Fig. 2.6 に示すような値となり、スリット幅 $0.25 \mu\text{m}$ 付近で、 $1/2$ 波長に相当する位相差 180° を得ることができる. ただし、スリット幅を狭くしすぎると、カットオフの領域に到達して透過率が極端に小さくなる恐れがあることに留意する必要がある. 以上のような特

¹²ただし、方解石は薄い加工が困難なので、ゼロオーダーの複屈折位相差を得ることは難しい.

性により, 先行研究において, 波長約 $0.633 \mu\text{m}$ で $1/4$ 波長板相当の光学特性 [52], 及び $1/2$ 波長相当の位相差 170° [56] が, 実験的に実証されている.

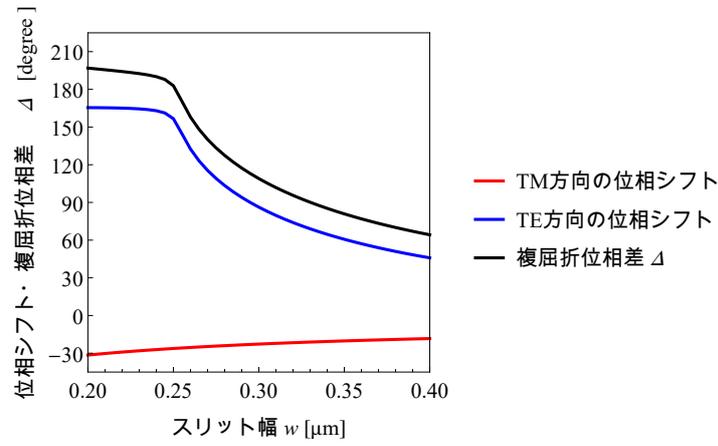


Figure 2.6: 波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$, 厚み $t = 0.3 \mu\text{m}$ における Au ナノグレーティングの複屈折位相差の理論計算結果.

2.3 面外駆動型 BRM による複屈折の変化

式 (2.1) で示したように、複屈折位相差は、複屈折材料の厚さ t で調節することができる。したがって、Au ナノグレーティングの厚さを擬似的に変化させることができれば、複屈折を変化させることが可能になる。そこで本研究では、Au ナノグレーティングを構成する Au 梁を面外方向に駆動させ、実効厚さを制御する手法を考案した。

2.3.1 提案する BRM の原理

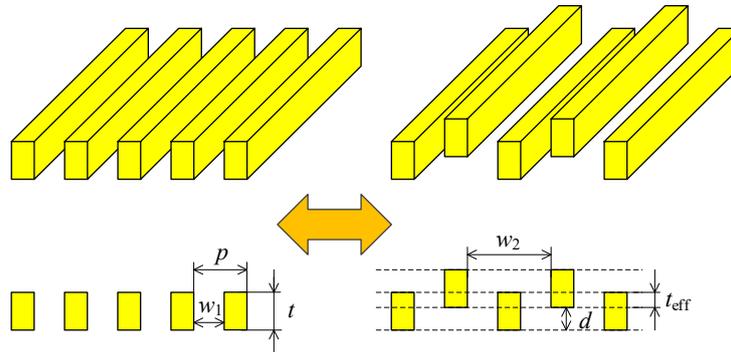


Figure 2.7: 本研究で提案する BRM の基本概念。一本おきの面外駆動によって、擬似的な 3 層の Au ナノグレーティングが生じる。

本研究で提案する BRM の基本概念を Fig. 2.7 に示す。Au ナノグレーティングを構成する厚さ t の Au 梁構造に対して、一本おきに面外駆動特性を付与することにより、グレーティング断面の幾何関係が変化する。駆動する梁が d 変位した時、MIM 構造を保っている厚さ $(t - d)$ を実効厚さ t_{eff} と定義する。Au ナノグレーティングの複屈折特性は、スリット幅 w_1 の MIM 構造部分で発現するため、主たる複屈折特性は t_{eff} で発現する。これより、駆動する梁を面外方向に駆動させることで、実効屈折率を減少させ、複屈折位相差を減少させることができると考えた。この時、スリット幅 w_2 の擬似的なグレーティングが上下に生じることになるが、これらの MIM 構造はスリット幅が広くなるため、複屈折特性への寄与はそれほど大きくはないと推測した。

2.3.2 近似解析による複屈折可変特性の確認

本手法の妥当性を確認するため、近似モデルによる複屈折位相差の概算を行った。面外駆動が生じた状態の Au グレーティングを、3 層のグレーティングが集積した状態であると近似する。即ち、スリット幅 w_1 で厚さ $t_1 = (t - d)$ のグレーティング層の上下

に、スリット幅 w_2 で厚さ $t_2 = d$ のグレーティング層があると近似する。Au ナノグレーティングの TE, TM 方向の実効屈折率は、スリット幅 w の関数と考えることができるため、複屈折位相差 δ は、スリット幅 w とグレーティング厚さ t の関数と考えることができる。そこで、中央のグレーティング層で生じる複屈折位相差を δ_1 、上下のグレーティング層の各層で発生する複屈折位相差を δ_2 とすると、最終的に得られる位相差 δ_{total} は、次の式で表すことができる。

$$\delta_{\text{total}} = \delta_1(w_1, t_1) + 2\delta_2(w_2, t_2) = \delta_1(w_1, t - d) + 2\delta_2(w_2, d) \quad (2.7)$$

ただし、 $0 \leq t_1, t_2 \leq t$ なので、 $t \leq d$ の範囲では $t_1 = 0$, $t_2 = t$ であることに注意する。

式 (2.7) より、変形量に対する位相差の変化を計算した。各パラメータは、波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ 、スリット幅 $w_1 = 0.25 \mu\text{m}$ 、グレーティング周期 $p (= w_2 - w_1) = 0.5 \mu\text{m}$ 、Au 膜厚 $t = 0.3 \mu\text{m}$ とした。計算結果を Fig. 2.8 に示す。式 (2.1) より、位相差は複屈折材料の厚みに比例するため、中間のグレーティングで生じる位相差が機械的変形量の増加に伴って減少するのに対し、上下のグレーティングで生じる位相差は、変形量と共に増加する。Fig. 2.6 で示したように、スリット幅が狭いほど位相差が大きくなることから、上下のグレーティングと比較して、中間のグレーティングの位相差の寄与が大きいことがわかる。変形量が Au 層の厚さ t を超えると、上下のグレーティングで生じる位相差の合計値で収束する。結果として、この例では、位相差を 182.9° から 52.0° まで変化させることができる可能性があることが示された。この位相差変化量を複屈折変化量に換算してみる¹³。各層の厚みが変形量 d の値によって変化することに注意し、各層の複屈折を計算して合算すると、複屈折量は $1.07 \sim 0.15$ まで変化すると見積もることができる。

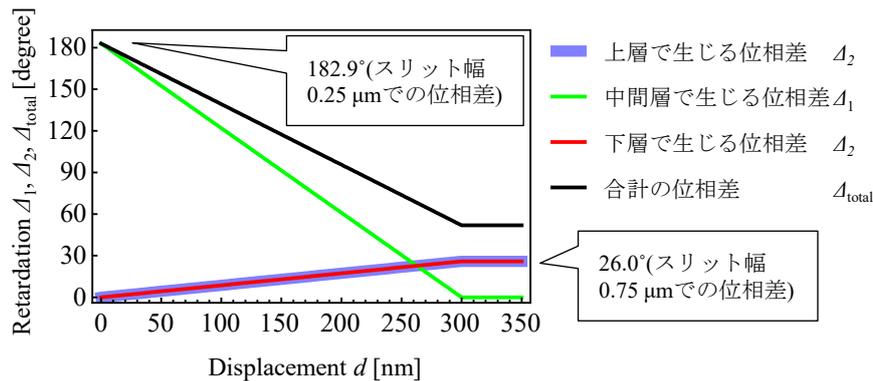


Figure 2.8: 3層のグレーティングで近似した場合の、機械的変形量に対する位相差の変化。ただし、 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$, $w_1 = 0.25 \mu\text{m}$, $p = 0.5 \mu\text{m}$, $t = 0.3 \mu\text{m}$.

¹³位相差から、素子の複屈折量を算出するには、位相差 [degree] $\times \lambda / (360^\circ \times t)$ を計算すればよい。

代表的な可視光波長に注目し、一例として、光強度制御に応用するために必要な複屈折位相差 $0^\circ \sim 180^\circ$ の変化が実現可能か、3層近似の理論的解析によって検証する。入射光波長 λ を、超高精細画質テレビ国際規格 BT.2020¹⁴ の色の三原色を参考に、 $0.46 \mu\text{m}$ (青), $0.53 \mu\text{m}$ (緑), $0.63 \mu\text{m}$ (赤) の3波長とし、スリット幅と面外変形量に対する位相差の変化を見積もった。

計算を行うにあたり、各寸法パラメータは、グレーティング周期 $p=0.6 \mu\text{m}$, Au 層厚さ $t=0.35 \mu\text{m}$ に設定した。計算結果をまとめたグラフを Fig. 2.9 に示す。それぞれのカットオフ付近のスリット幅に注目し、位相差変化量を Table 2.2 にまとめた。長波長になるにつれて変化量がやや小さくなるが、いずれの波長においても 180° に近い位相差変化量が得られる可能性があることが見積もられた。

ここで提案した3層のグレーティングで近似する理論計算は、各層で発生する位相差を別々に計算しているため、各層間の作用を無視している。サブ波長程度の構造が規則的に並んでいるため、近接場での共鳴現象等が生じる可能性があり、全ての実現象を考慮した解析とは言い切れない。したがって、本解析結果の妥当性を判断するには、実測値との比較が必要である。また、より正確な見積もりを行うには、有限差分時間領域法などの電磁場数値解析を行う必要がある。

Table 2.2: 位相差変化量の見積もり

波長	スリット幅 w_1	スリット幅 $w_2 = p + w_1$	位相差変化量
$0.46 \mu\text{m}$	$0.15 \mu\text{m}$	$0.75 \mu\text{m}$	$182^\circ (212^\circ \sim 31^\circ)$
$0.53 \mu\text{m}$	$0.20 \mu\text{m}$	$0.80 \mu\text{m}$	$167^\circ (234^\circ \sim 67^\circ)$
$0.63 \mu\text{m}$	$0.25 \mu\text{m}$	$0.85 \mu\text{m}$	$159^\circ (211^\circ \sim 52^\circ)$

¹⁴Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange (番組制作ならびに国際番組交換に用いる UHDTV システムのパラメータ)

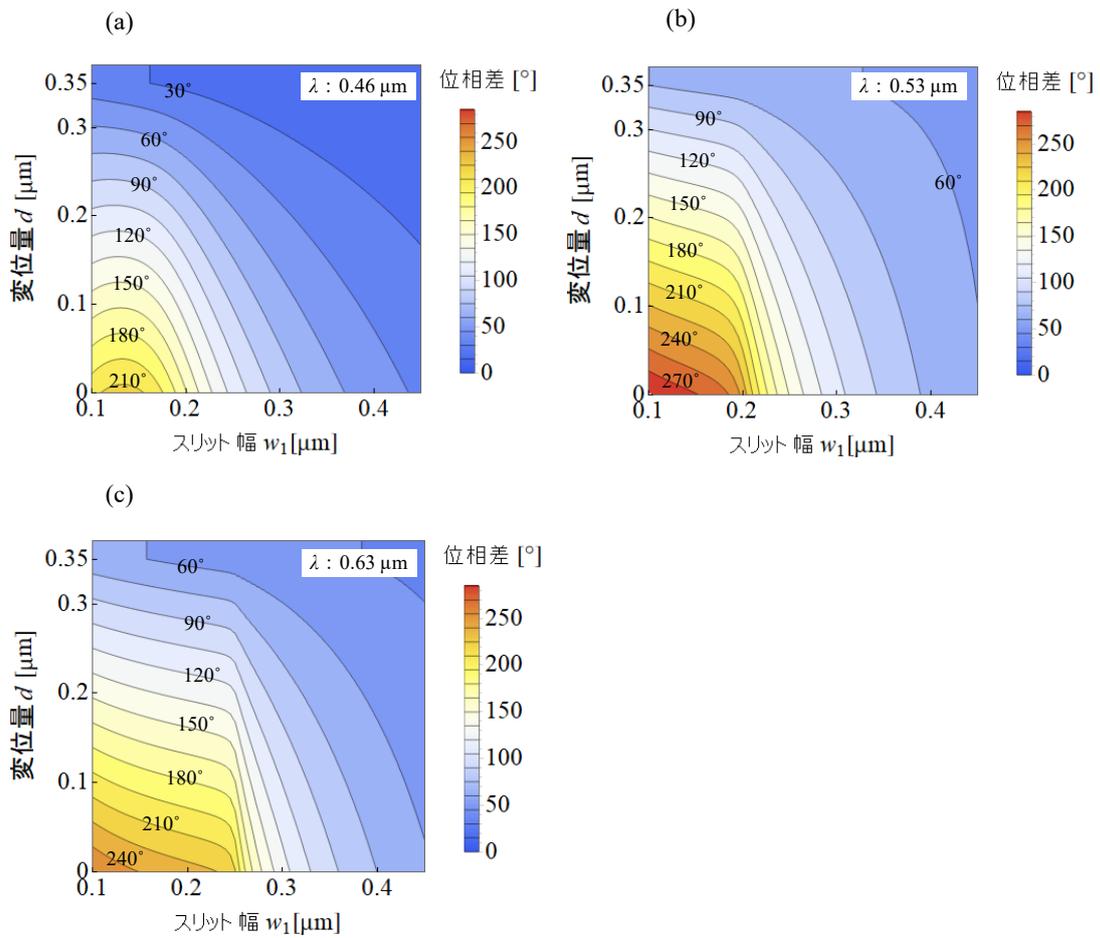


Figure 2.9: スリット幅及び変形量に対する位相差の理論解析結果. (a) 波長 $0.46 \mu\text{m}$. (b) 波長 $0.53 \mu\text{m}$ (緑). (c) 波長 $0.63 \mu\text{m}$. ただし, グレーティング周期 $p=0.6 \mu\text{m}$, Au 層厚さ $t=0.35 \mu\text{m}$.

2.4 本章のまとめ

本章では、本研究の目的である複屈折可変メタサーフェスの原理と、理論的な解析による検証について述べた。Au ナノグレーティングには、以下のような特徴があることを述べた。

- 幅、厚み共にサブ波長スケールの Au のラインアンドスペースで構成される。
- TE 方向では伝搬定数が真空中より小さくなり、TM 方向では伝搬定数が大きくなるといった、逆方向の特性が得られる。
- グレーティングの周期、スリット幅、厚さによって、複屈折位相差を制御することができる。
- 入射光波長 $0.633 \mu\text{m}$ において 170° ($1/2$ 波長板相当) の複屈折位相差が実験的に実証されている。

複屈折位相差は、複屈折材料の厚さ t で調節することができる。したがって、Au ナノグレーティングの厚さを疑似的に変化させることができれば、複屈折を動的に制御することが可能になると考えられる。そこで本研究では、Au ナノグレーティングを構成する Au 梁を面外方向に駆動させ、実効厚さを制御する手法を考案した。Au ナノグレーティングを構成する厚さ t の Au 梁構造に対して、一本おきに面外駆動特性を付与することにより、グレーティング断面の幾何関係が変化する。この面外駆動によって実効厚さを動的に制御し、複屈折可変のメタサーフェスを実現できると考えた。

面外駆動中の Au ナノグレーティング断面を 3 層のグレーティングの集積とみなすことで、複屈折位相差の変化を理論的に検証した。代表的な波長 $0.46 \mu\text{m}$, $0.53 \mu\text{m}$, 波長 $0.63 \mu\text{m}$ において、 180° に近い位相差変化を得られる可能性があることが見積もられた。この結果により、本研究で提案する BRM は、光強度制御への応用が可能な複屈折変化が実現できる可能性があることが示された。より正確な見積もりを行うには、有限差分時間領域法などの電磁場数値解析を行う必要がある。

次章では、BRM の実験的検証のコンセプト及び実験のための準備について述べる。

第3章

実験的検証のための準備

第2章において、本研究で提案するBRMは、厚みに対して大きな複屈折変化が実現できる可能性があることが示された。そこで、Auナノグレーティングの面外駆動による複屈折変化量を実験的に検証することを試みた。本章では、実証方法として考案した2種類の面外駆動方式のコンセプトと、それらを実現するために利用した加工技術及び光学測定技術について述べる。

3.1 面外駆動手法の概要

Auナノグレーティングを面外駆動させる方法として、2種類の手法を考案した。ひとつは、静電引力で引張り上げる方式、もうひとつは、通電加熱による熱膨張を利用する方式である。以降、前者を静電駆動方式、後者を電熱駆動方式と呼称する。

3.1.1 静電駆動方式による面外駆動のコンセプト

静電引力は、MEMSアクチュエータで利用される代表的な力である[68]。駆動対象と電極とを一定の間隔を持たせて配置し、それらに引き合う(あるいは反発する)ような電位差を与えることで、静電力が発生する。駆動対象のアンカーなどを細くするなど、ばね定数の小さい構造を作っておくことで、変形が生じる。弾性領域内の静電力であれば、印加電圧を0にすることで、ばね復元力で構造は元の位置に戻る。また、電位差を調整することで、変形量を調整することができる。

本研究で提案する静電駆動方式による面外駆動のコンセプトをFig. 3.1に示す。本研究では、駆動する梁を一体の自立構造として製作し、上部に設置した透明電極との電位差で面外に引き上げる構造を考案した。この時、非駆動梁が基板に固定された状態になるように、製作工程を工夫した。静電駆動方式の面外駆動型BRMの製作と評価については、第4章で述べる。

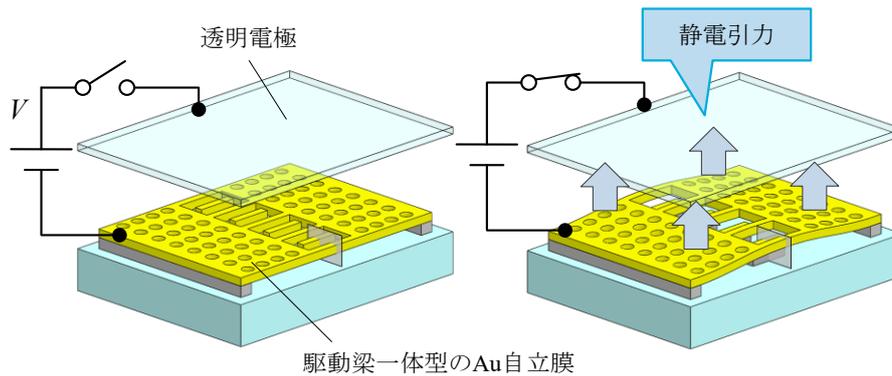


Figure 3.1: 静電駆動方式の面外駆動型 BRM のコンセプト図.

3.1.2 電熱駆動方式による面外駆動のコンセプト

MEMS・NEMS は、いわゆるサイズ効果の影響を受けるため、身近な生活の感覚や常識とは離れた現象を利用できることがある。その代表例が、温度変化によって構造の体積変化が生じる「熱膨張」である。熱膨張は、夏の気温上昇で線路が曲がってしまう座屈現象を引き起こすなど、構造体の設計では忌み嫌われることが多い。しかしながら、それをうまく利用することで、サーモスタットのような温度管理用のセンサに利用される例も存在する。2種類の金属片を貼り合わせ、その熱膨張率の差を利用して機械的なスイッチとして利用する手法は、およそ 100 年前から既に提案されており [69]、このような組み合わせ梁構造を「バイモルフ」という。特に、2種類の金属で構成されている場合は「バイメタル」という。バイモルフ構造で生じる機械的変形は、材料の熱膨張率の差、温度変化量、構造の初期長さによって決まる。熱容量は長さの 3 乗に比例して小さくなるため、MEMS スケールの構造は温度が上昇しやすい。質量 (おもり) も長さの 3 乗に比例して小さくなるため、結果として、マクロな世界と比較して温度変化に対する変位量が大きくなる。したがって、低エネルギーで駆動力の大きいアクチュエータとして、様々な MEMS にバイモルフ構造が利用されている [70, 71, 72, 73]

本研究で提案する電熱駆動方式による面外駆動のコンセプトを Fig. 3.2 に示す。本研究では、Au ナノグレーティングを構成する梁を、Au と誘電体のバイモルフ構造で置き換え、グレーティングそのものを面外駆動させる手法を考案した。Au 層に電圧を印加するだけで、ジュール加熱による温度上昇で梁が湾曲するように、パターンングを工夫した。電熱駆動方式の面外駆動型 BRM の製作と評価については、第 5 章で述べる。

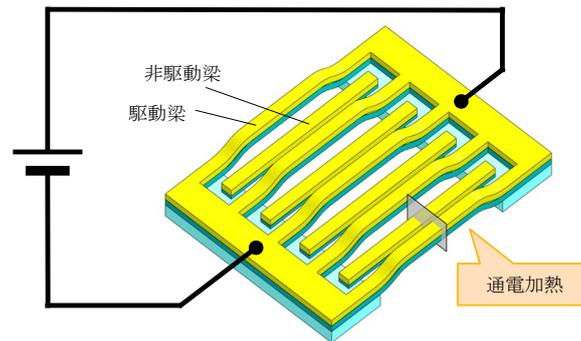


Figure 3.2: 電熱駆動方式の面外駆動型 BRM のコンセプト図.

3.2 本研究で利用した加工技術・観察手法

本項では、面外駆動型 BRM の実験的検証のために利用した、加工技術と各種条件について述べる。

3.2.1 加工レートの導出手順

本研究で用いた各種成膜・エッチングの時間制御のため、予備実験として加工レートの導出を行った。実験データおよび導出した加工レートは、各加工技術の項に記載した。予備実験の手順を以下に示す。

- デバイス製作で使用するものと同等の石英ガラス基板を用意し、有機洗浄を行った。
- ポリイミドテープを基板の一部に貼付け、加工されない領域を用意した。
- 加工後にテープをはがし、粘着剤が残るようであれば、ピラニア洗浄もしくは有機洗浄を行った。
- 触針式段差計を用いて、テープ端部分に生じた加工跡の高低差を複数ヶ所で測定した。測定には、DextakXT (Bruker) を用いた。
- 測定データの平均値を、その加工条件の実験データとした。
- 実験データをグラフ化し、全データで線形近似した際の傾きを、加工レートとした。
- 実験データは随時追加していき、その都度加工レートを更新し、最新のレートを使用した。

3.2.2 パターニング技術

電子ビーム描画

感光材に電子ビームを照射して、ナノ・マイクロサイズのパターンを描画するための装置として、電子ビーム (EB: Electron Beam) 描画技術を利用した。静電駆動方式 BRM の製作では、重ね描画精度と解像度を重視する製作工程のため、ポイントビーム方式の JBX-6300FS (JEOL) を使用した。電熱駆動方式 BRM の製作では、大面積電極パターンとナノグレーティングパターンを同時に描画する必要があったため、ナノテクプラットフォーム東大拠点 (VDEC) 現有で可変成型ビーム方式の高速大面積描画装置 F5112+VD01 (ADVANTEST) を使用した。

Table 3.1 に、EB 描画工程の基本プロセスを示す。レジストは疎水性のため、前工程として水分除去ベークと、疎水処理用のシランカップリング剤である HMDS(ヘキサメチルジシラザン) のコーティングを行った¹。EB 描画工程では、状況に応じて数種類のレジスト及び条件を使い分けたため、詳細な条件は製作工程の項に記した。本研究で使用した基本的な条件を Table 3.2 に示す。

また、現像工程後に、残渣を除去するために O₂ プラズマアッシング (FA-1, SAMCO) を行った。

フォトリソグラフィ

サブ波長スケールの微細構造を含まず、設計変更の少ないパターンを描画する際は、フォトリソグラフィを使用した。フォトリソグラフィで使用するフォトマスクは、VDEC の作業環境を利用して製作した。

本研究では、両面露光機 PLA-501S (Canon) を使用した。フォトリソグラフィの基本プロセスは、Table 3.1 と同様である。ただし、電子ビームを使用しないので、エスペイサ塗布の工程は不要である。本研究で使用した露光条件は Table 3.2 に合わせて示した。

¹HMDS は雰囲気中で塗布することを前提に製造されているため、スピンコート条件は環境ごとに実験的に決定している。

²Post Exposure Bake の略。露光後ベーク。レジストによっては不要なものもある。

Table 3.1: EB 描画工程の基本プロセス

手順	工程	スピコート回転数	ベーク温度	時間
1	水分除去ベーク	-	110°C	10 min
2	HMDS 塗布	2500 rpm	-	60 sec
3	ベーク	-	110°C	60 sec
4	レジスト塗布	※	-	※
5	プリベーク	-	※	※
6	エスペイサ塗布	2500 rpm	-	60 sec
7	ベーク	-	※	※
8	露光	-	-	-
9	PEB ²	-	※	※
10	エスペイサ除去	純水に浸漬	-	-
11	現像・リンス	-	-	※
12	ポストベーク	-	110°C	90 sec
13	O ₂ アッシング	-	-	(適宜調整)

Table 3.2: レジストごとの条件

プリベーク	露光量	PEB	現像	ポストベーク
OEBRCAP112PM(ポジ型 EB レジスト, 東京応化工業)				
110°C, 120 sec	6.0 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	110°C, 90 sec	TMAH, 60~120 sec	110°C, 90 sec
OEBCAN40-AE2cp(ネガ型 EB レジスト, 東京応化工業)				
100°C, 60 sec	18~ 25 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	130°C, 60 sec	TMAH, 60 sec	130°C, 90 sec
gL2000-14(ポジ型 EB レジスト, グルーオンラボ)				
180°C, 90 sec	300 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	110°C, 90 sec	専用液, 120 sec	110°C, 10 min
OFPR-800LB 34cp(ポジ型フォトレジスト)				
110°C, 90 sec	45 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$	不要	TMAH, 2 min	120°C, 90 sec

3.2.3 成膜加工技術

真空蒸着

リフトオフ工程で金属をパターンニングする際は、真空蒸着法を利用した。本研究では、2種類の加熱方法が利用可能な蒸着装置 (SVC-700EB, サンヨー電子) を使用した。比較的融解しやすい Au を成膜する際は、導電性の支持体のジュール熱で加熱する抵抗加熱蒸着を採用した。融点の高い Cr を成膜する際は、高エネルギーの電子で局所的に高温に加熱することができる電子ビーム加熱蒸着を採用した。蒸着中の膜厚は膜厚計を用いてリアルタイムに表示した。膜厚計は、金属の密度を事前に設定し、測定器の振動数の変化を計測することで膜厚を算出することができる。そのため、基板への蒸着を妨げず、且つ膜厚を正確に算出できるような位置に設置することに注意した。

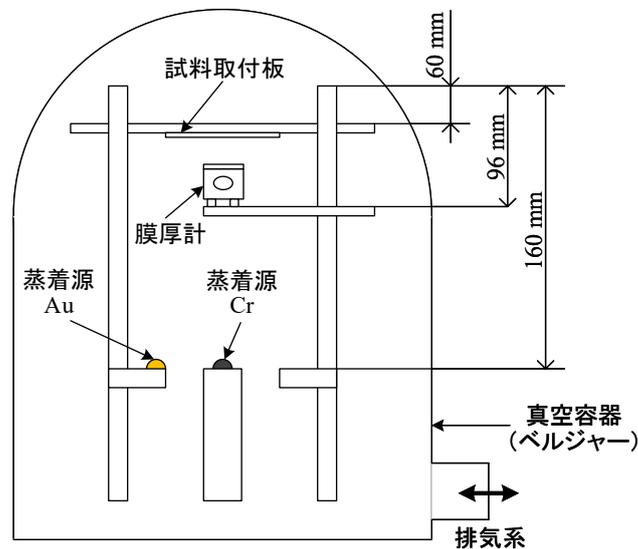


Figure 3.3: 真空蒸着時のセッティング条件.

スパッタリング成膜

金属や誘電体のベタ膜を成膜する際は、スパッタリング成膜を利用した。本研究では、対向ターゲット型スパッタリング成膜装置 (NFTS-3S-R0601, FTS) を使用した。基板は、Fig. 3.4 に示すような基板導入用ホルダにポリイミドテープで貼りつけて固定した。本装置は、プラズマ用の電源として、DC 電力と RF 電力を印加することができるため、それぞれの設定値についても成膜条件に記載した。チャンバ内圧力は、ガス流量とメインバルブを操作することで調整した。Table 3.3 に、本研究で使用した成膜条件と、予

備実験によって算出した成膜レートを示す。

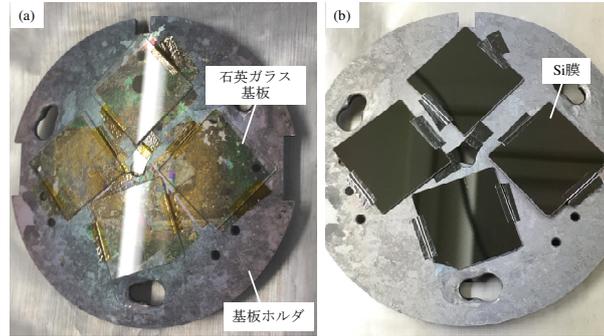


Figure 3.4: 基板ホルダに試料基板を貼付けて固定した様子. (a) 成膜前の石英ガラス基板の一例. (b) Si 成膜後 (設計膜厚 200 μm).

Table 3.3: スパッタリング成膜条件

Au			
成膜レート	14.4 nm/min	チャンバ圧力	4.0×10^{-1} Pa
DC/RF	0 W/ 300 W	ガス流量	Ar:50 sccm
Cr			
成膜レート	10.3 nm/min	チャンバ圧力	4.0×10^{-1} Pa
DC/RF	0 W/ 300 W	ガス流量	Ar:50 sccm
Si			
成膜レート	37.9 nm/min	チャンバ圧力	2.0×10^{-1} Pa
DC/RF	1000 W/ 0 W	ガス流量	Ar:25 sccm
SiO ₂			
成膜レート	12.7 nm/min	チャンバ圧力	2.0×10^{-1} Pa
DC/RF	800 W/ 300 W	ガス流量	Ar:10 sccm O ₂ :10 sccm

3.2.4 除去加工技術

Cr ウェットエッチング

Cr を化学的に除去する手法の一つとして、Cr エッチャントを用いたウェットエッチング技術を利用した。本研究では、クロム膜エッチング液 N14B (日本化学産業) を使用

した。液体を用いたエッチングでは、液の進行が開口の影響を受けるため、エッチングレートの設定は行わず、目視による観察を基準とした。また、同様の理由から、接着層のような非常に薄い Cr 膜であれば、水平方向のエッチング進行速度は非常に遅くなる。したがって、本研究では接着層 Cr 層のウェットエッチングの進行については考慮せずに加工を行った。

反応性イオンエッチング (RIE)

金属や誘電体膜を垂直に加工したい時は、反応性イオンエッチング (RIE: Reactive Ion Etching) を使用した。RIE は、反応性ガスをプラズマ化して試料に衝突させることで除去加工を行う、ドライエッチングプロセスである。プラズマ化したガスはイオンとラジカルに分離しており、活性の高いラジカル原子との化学反応と、イオンの衝突による物理的エッチングが相互作用することで、エッチングが進行する。RIE は、反応性ガスとエッチングマスク材を適切に選択することで、高い選択比³で、かつ比較的垂直にエッチングすることができる。また、同じ原理で Ar などの不活性ガスを利用すれば、物理的な作用のみを利用したエッチングも可能である。

本研究では、卓上 RIE 装置 (TEP-Xd, 立山マシン) を使用した。予備実験で算出した、被エッチング材毎のエッチングレートを Table 3.4 に示す。

Table 3.4: RIE のエッチング条件 (予備実験により算出)

被エッチング材	使用ガス	RF 電力	チャンバ内圧力	エッチングレート
Si	SF ₆	30 W	0.3 Pa	518 nm/min
	Ar	30 W	0.3 Pa	2.7 nm/min
SiO ₂	SF ₆	30 W	0.3 Pa	206.6 nm/min
石英ガラス	SF ₆	30 W	0.3 Pa	203.5 nm/min
Cr(蒸着)	SF ₆	30 W	0.3 Pa	9.6 nm/min
Cr(スパッタ)	SF ₆	30 W	0.3 Pa	7.3 nm/min
	Ar	30 W	0.3 Pa	1.2 nm/min
Au	SF ₆	30 W	0.3 Pa	55.9 nm/min
	Ar	30 W	0.3 Pa	59.9 nm/min

³選択比とは、「被エッチング材料のエッチングレート/マスク材のエッチングレート」で表される、エッチング工程の指標の一つである。マスク材のエッチング耐性が強いほど、または被エッチング材の反応性がよいほど、選択比は大きな値を取る。基本的には選択比が大きいほど、所望の形状を得やすい条件であるといえる。

XeF₂ ガスエッチング

XeF₂ ガスは Si とよく反応して Si を気体の化合物に変えるため、Si をエッチングする際に用いられる。XeF₂ は昇華によりガス化する性質のため、蒸気フッ酸のように微小開口で凝縮して液体に戻りスティッキングが発生してしまう恐れがない。

本研究では、自動エッチング装置である VPE-4E (SAMCO) を使用した。本装置は、充填室へのガス充填時間 (エッチングガス量の設定⁴)、エッチング時間 (反応室へのガス流入時間⁵)、エッチングサイクル回数の 3 項目で条件を設定できる。ガス充填時間及び、エッチング時間は、いずれも標準条件の 10 sec とし、エッチングサイクル回数を増減することで、条件を調整した。

3.2.5 基板洗浄工技術

デバイス製作工程中の各種汚れや残渣の除去を行う際に行った洗浄工程について述べる。本研究では、特に断りのない限り、20 mm 角基板用の洗浄用治具 (テフロン製、研究室で製作) を用いて洗浄を行った。

中性洗剤による洗浄

購入後のガラス基板は、精密洗浄用中性洗剤のディポッシュ (千葉ファインケミカル) を使用して洗浄を行った。一般的な台所用洗剤を用いた洗浄と同様の界面活性作用を利用し、工業汚れやパーティクルを除去するために使用した。ディポッシュによる洗浄では、純水に混ぜてよく攪拌した液を洗浄液として使用した。

Table 3.5: 中性洗剤洗浄工程

手順	薬品 (又は工程)	時間	回数	備考
1	ディポッシュ洗浄液	5 min	1	超音波洗浄
2	純水	1 min	適宜調整	〃
3	エアブロー			

⁴ 充てん室容積と一次圧で決まるため、時間を設定する必要はあまりない。むしろ、毎回のガスの元栓の開栓具合を揃え、一次圧条件を安定させることのほうが重要と思われる。

⁵ ガスを使い切ることを重視するのであれば、できるだけ長い方がガスの利用効率は良くなると思われる。ただし、エッチングレート (ここではエッチング量/サイクル数) を意識した使い方をするのであれば、標準条件に従っておくのが望ましいと思う。

有機洗浄

基板に付着した有機物を取り除く際、有機溶媒を使用した有機洗浄を行った。有機溶媒として、エタノールまたはエタコール7（エタノールと IPA の混合液）、アセトンを使用した。

Table 3.6: 有機洗浄工程

手順	薬品	時間	回数	備考
1	純水	1 min	2	超音波洗浄
2	エタノール (エタコール7)	1 min	2	〃
3	アセトン	5 min	1	〃
4	エタノール (エタコール7)	1 min	1	〃
5	純水	1 min	2	〃

ピラニア洗浄

基板に付着したレジストなどの有機物残渣が有機洗浄で取り切れなかった時は、ピラニア洗浄と呼ばれる硫酸過水溶液を用いた洗浄を行った。ピラニア洗浄は、硫酸の強い酸化作用と、硫酸と過酸化水素の反応で生じる熱を利用した洗浄方法である。

ピラニア洗浄で用いる硫酸過水溶液（通称ピラニア溶液）は、濃硫酸と過酸化水素水とを体積比 2:1 で混合したものを使用した。混合の際は、ガラス製ビーカーに先に濃硫酸を入れてから、過酸化水素水を入れることで、加熱を促した⁶。硫酸は金属を溶かすので、硫酸加水溶液内で基板を取り扱う際はテフロン製ピンセットを用いた。

Table 3.7: ピラニア洗浄工程

手順	薬品 (又は工程)	時間	回数	備考
1	濃硫酸 + 過酸化水素水 (体積比 2:1)	15 min	1	超音波洗浄
2	純水	1 min	6	〃
3	エアブロー			
4	加熱乾燥	20 min		200 °C

⁶理科の授業では一般に、硫酸と水を混合する際は過熱による突沸を防ぐために水に硫酸を入れるように教えられるが、ここでは加熱を促すために逆の手順を取っている。

3.2.6 観察技術

走査型電子顕微鏡

数百 nm の微細な構造の観察には、走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) を使用した。SEM は、試料に電子ビームを照射した際に放出される二次電子を検出することで、観察・分析を行う装置である。電子を媒介とするため、光の回折限界を超えるスケールの構造の観察を行うことができる。本研究において、構造の観察は主に S-4500 (日立) を使用して行った。

試料が誘電体の場合、帯電 (チャージアップ) による観察不良に注意する必要がある。Au などの導電体層が基板全体に成膜された状態では、装置の標準加速電圧 (20 kV) で観察を行った。サンプル表面のガラス基板部分の割合が多い場合は、基板のチャージアップを抑えるために、加速電圧を 1~5 kV に落とし、観察しやすい電圧で観察を行った。加えて、観察したい素子付近の電極パターンと試料台とを橋渡しするようにカーボンテープを貼り付け、帯電を抑える工夫をした。また、必要に応じて、試料に対して 10 nm の Cr 蒸着または Cr スパッタリング成膜を行い、導電性を確保した。

3.2.7 光学特性の検証方法

回転検光子法を用いた位相差測定手法

本研究では、ある外部入力を印加した状態において試料で発生する位相差を測定することで、可変複屈折の実証を行った。位相差測定を行った際に使用した光学系の概略図を Fig. 3.5 に示す。測定には、試料の位相差を測定する手法の一つである「回転検光子法」を使用した。図に示すように、2 枚の直線偏光子の間に試料を設置し、試料の遅相軸 (TM 方向) と進相軸 (TE 方向) に均等に光が入射するように、直線偏光を試料の進相軸から 45° 傾けて入射した。その後、検出器側の偏光子 (検光子, アナライザ) を回転させ、角度毎の光強度を分光器で取得することで、出射光の偏光状態を取得した。取得した角度毎の出射光強度を、光学系の出射光の理論式にフィッティングすることで、位相差を算出した。これ以降、角度毎の出射光強度を 0°~180° まで取得する作業を 1 サイクルの測定と表現する。

光学系の出射光の理論式の導出には、光学系を行列で表す手法であるミュラー行列と、それを解くことで得られるストークスパラメータを使用した。本研究の回転検光子法光学系のストークスベクトル \mathbf{S} は次のように示される。

$$\mathbf{S} = \mathbf{LP}_\theta \cdot \mathbf{X}_{45^\circ} \cdot \mathbf{LP}_{90^\circ} \cdot \mathbf{S}_{\text{ump}} \quad (3.1)$$

ここで, \mathbf{LP} は直線偏光子, \mathbf{X} は試料のミューラー行列である. θ は, 検光子の主軸の回転角度である. また, \mathbf{S}_{unp} は無偏光光源のストークスペクトルである. 本研究の試料は, TE, TM それぞれの透過率 (振幅透過率) が異なり, また位相差が発生する試料である. そのため, 試料 \mathbf{X} の部分は, 振幅透過率をパラメータに持つ「部分偏光子」と, 位相差をパラメータに持つ「位相子」のミューラー行列の積とした.

光学系のストークスペクトルを解くことで, 光学系のストークスパラメータが得られる. ストークスパラメータのうち, 出射光強度にあたる要素 S_0 を抜き出すと, 次の式となる.

$$S_0 = \frac{(p_1^2 + p_2^2) - 2p_1p_2 \cos \delta \cos 2\theta + (p_1^2 - p_2^2) \sin 2\theta}{8} \quad (3.2)$$

ここで, δ, p_1, p_2 は, 位相差及び TE, TM 偏光ごとの振幅透過率である. 式 (3.2) が, 本光学系の出射光の理論式である. 理論式へのフィッティングは, 市販の数値処理ソフト Mathematica(Wolfram) の FindFit 関数を使用した. 振幅透過率 p_1, p_2 には, 同光学系で測定した TE, TM 偏光の振幅透過率を代入した. 透過率の算出方法は次項に示した.

本手法を用いた測定データへのフィッティングの一例を Fig. 3.6 に示す. ある特定の波長における分光測定データの 1 サイクルの測定データ (分光器で取得した透過光強度) に対して, 光学系の出射光強度の理論式 (式 3.2) をフィッティングすることができた. 位相差の算出では, このフィッティング作業を各波長ごとに行い, 位相差スペクトルとしてデータを取得した.

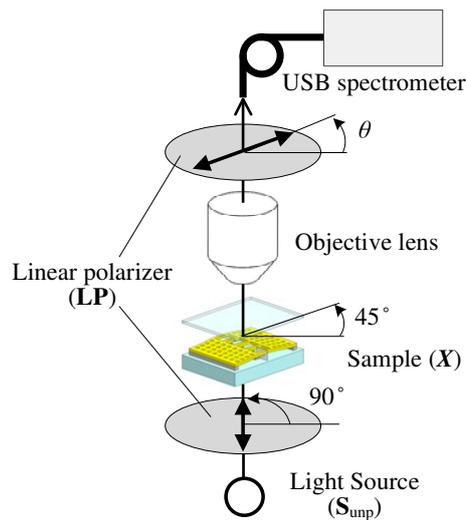


Figure 3.5: 位相差測定で使用した光学系の概略図.

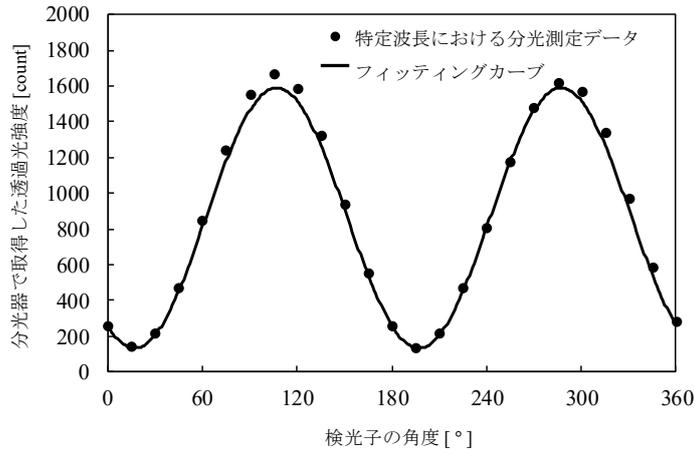


Figure 3.6: ある波長における分光測定データ及びフィッティングカーブの一例.

本光学系及びデータ処理手法を用いた位相差測定の妥当性を確認するために、位相差が生じる市販の光学素子を試料として、位相差の測定を行った。試料には、波長 $0.633 \mu\text{m}$ で位相差 90° の性能が保証されている $1/4$ 波長板を用いた。本測定では、検光子角度 10° 毎に $0^\circ \sim 360^\circ$ まで透過光強度を取得した。試料を用いて回転検光子法による測定を行うことで取得した位相差スペクトルを Fig. 3.7 に示す。本測定より、波長 $0.633 \mu\text{m}$ で位相差 89.9° 結果を得た。これより、本測定手法による位相差測定の精度を確認することができた。また、位相差スペクトルは、長波長になるにつれて位相差が減少するという波長分散性を確認することができた。ただし、位相差スペクトルには波長に依存するようなピークが生じることがわかった。

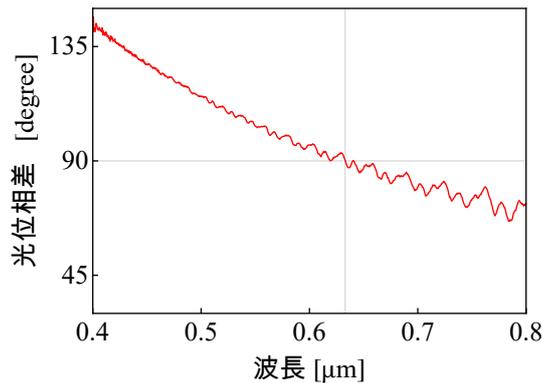


Figure 3.7: 位相差スペクトル測定の予備実験。試料は波長 $0.633 \mu\text{m}$ で位相差 90° の性能が保証されている $1/4$ 波長板。

透過率の算出

本研究の BRM は、TE、TM それぞれの透過率 (振幅透過率) が独立して変化する可能性があるため、それぞれ算出した。振幅透過率は、前述した回転検光子法で取得したデータのうち、検光子の光軸が BRM の TE 方向、TM 方向に一致している時の透過光強度データを、同条件での石英ガラス基板の透過光強度データで除することで算出した。検光子の光軸が BRM の TE 方向、TM 方向に一致している時の検光子角度は、それぞれ $\theta = 45^\circ$ 、 135° である。

光学系の構築

本光学系は、偏光顕微分光システム DF-1037 (テクノシナジー) を使用して構築した。分光器は、QE65000 または USB2000 (いずれも OceanOptics) を使用した。セッティングした光学系の一例を Fig. 3.8 に示す。分光器に接続するファイバのコア径と、対物レンズの倍率は、観察する試料の形状や実験のセッティング、観察したい領域にあわせて適宜変更した。

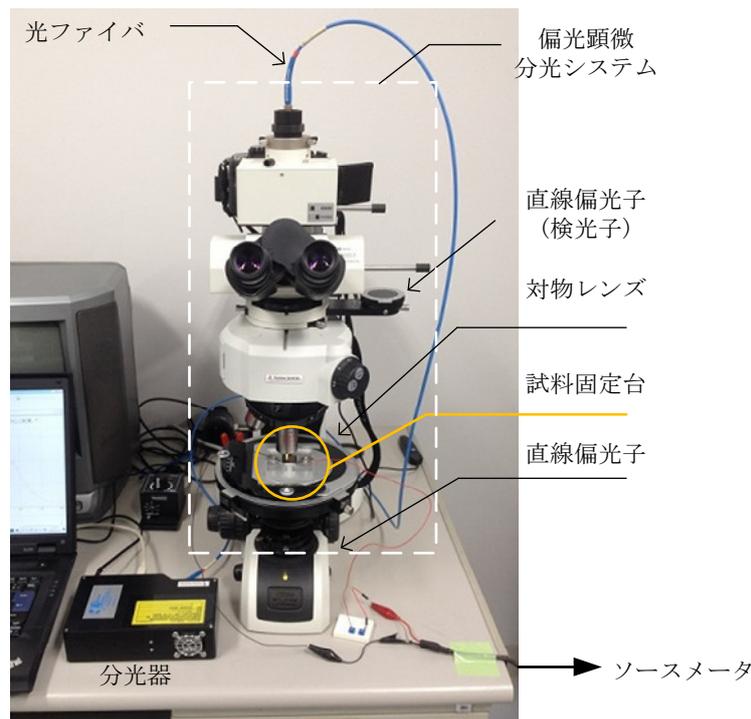


Figure 3.8: 位相差測定で使用した光学系の一例。

3.3 本章のまとめ

本章では，面外駆動型 BRM の実験的検証を行うために行った準備について述べた。まず，Au ナノグレーティングを面外駆動させる方法として，以下の2種類の手法を考案した。

- 静電引力で引張り上げる「静電駆動方式」
- 熱膨張を利用する「電熱駆動方式」

いずれの手法も MEMS の駆動手法として利用される原理に基づいており，外部からの電圧印加によって変形量を制御することが可能である。また，これらの手法を実際に適用して実験的検証を行うために利用した加工技術及び光学測定手法についてまとめた。次章より，実験的検証について具体的に述べる。

第4章

静電駆動方式の面外駆動型 BRM

本研究では，Au ナノグレーティングを構成する Au 梁を面外方向に駆動させ，実効厚さを制御する手法を考案した．まず，駆動手法として静電駆動を適用し，実験的な検証を行った．本章では，静電駆動方式の面外駆動型 BRM の試作と複屈折可変特性の評価について述べる．

4.1 駆動手法の設計

4.1.1 静電駆動方式 BRM の駆動手法

本研究で提案する静電駆動方式の面外駆動型 BRM の概略図を Fig. 4.1 に示す．BRM は，石英ガラス基板上に製作した．駆動梁と非駆動梁は，下層の Si 犠牲層の選択的なエッチングにより分割した．駆動梁は，両端が Au 自立膜に接続しており，電圧印加により Au 自立膜ごと面外に駆動するようにした．BRM 上部に電極として ITO (Indium Tin Oxide) 製の透明基板を配置した．ITO は可視光を透過するので，透過光への影響はないと考えた．透明電極と Au 自立膜に電極を接続して電位差を与え，Au 自立膜を電極基板方向に引張り上げることで，グレーティングに面外方向の変形を与えることができる．またこの時，非駆動梁は，基板に固定された状態になるように製作工程を工夫した．

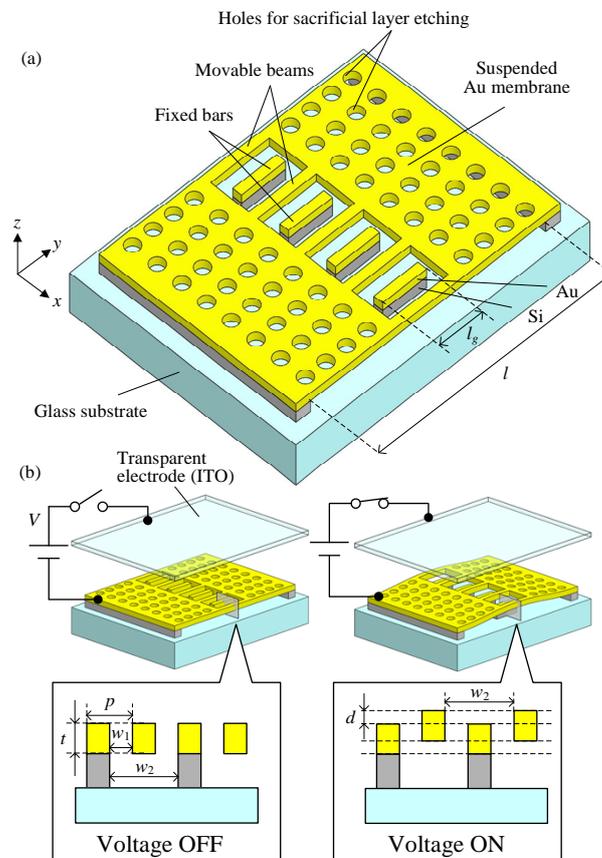


Figure 4.1: (a) 静電駆動方式の面外駆動型 BRM の概略図. (b) 当面電極基板を BRM の上部に設置し、電圧印加により駆動部分を引張り上げる。これにより、グレーティングの断面構造が変化する。

4.1.2 変形量の解析

印加電圧の大きさを見積もるために、駆動梁の変位と印加電圧の大きさの関係を理論的に導出した。そこで、静電駆動 Au ナノグレーティングのモデルを設定し、電圧印加時の駆動梁の変位の解析を行った。

解析のモデル

解析に用いたモデルを Fig. 4.2 に示す。長さ l 、幅 b 、厚さ t の駆動梁と、駆動梁の上部に g_0 の距離を開けて配置されている透明電極の間に、大気中で電圧 V を印加する場合を考える。

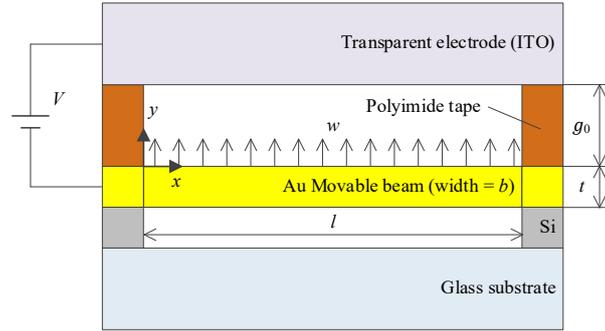


Figure 4.2: 駆動梁の解析モデル.

駆動梁のたわみの式の導出

梁に加わる分布荷重について考える．駆動梁は両端固定梁であり，静電気力による分布荷重 w [N/m] が加わる．ここでは，重力によるたわみは微小のため無視した．また，ここでは梁が上向きに変形することを考えたいので， y 軸は上向き方向を正とする．

静電気力による分布荷重

まず，静電気力による荷重 w を導出する．ある区間における単位長さあたりの駆動梁と透明電極の間の静電容量 C は，駆動梁と透明電極が平行平板コンデンサであると考えると，

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{b}{g} \quad (4.1)$$

と表せる．ただし， ε_0 は真空の誘電率， ε_r は空気の比誘電率である．また， g は駆動梁と電極間の距離であり

$$g = g_0 - y \quad (y: \text{駆動梁の } y \text{ 軸方向の変位}) \quad (4.2)$$

である．これより，単位長さあたりの駆動梁と透明電極の間の静電エネルギー U は

$$U = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b}{2g} V^2 \quad (4.3)$$

と表される．式 (4.3) より，静電エネルギーは駆動梁と透明電極の間の距離 g に反比例するポテンシャルエネルギーであることがわかる．したがって，透明電極に加わる y 軸方向の分布荷重 w' は

$$w' = \frac{\partial U}{\partial g} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b}{2g^2} V^2 \quad (4.4)$$

となる。以上より、駆動梁に加わる y 軸方向の分布荷重 w は以下の式で表される。

$$w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b}{2g^2} V^2 \quad (4.5)$$

駆動梁のたわみ式

次に、駆動梁のたわみ式 $y(x)$ を求める。Fig. 4.2 に示すように、 x 軸は、駆動梁の左端を原点として駆動梁の長手方向を正とした。駆動梁の左端における反力を R_A 、反モーメントをそれぞれ M_A とすると、モーメントのつり合い式より、曲げモーメント $M(x)$ は、

$$M(x) = M_A + R_A x - \int_0^x w x dx = M_A + R_A x - \frac{1}{2} w x^2 \quad (4.6)$$

と表せる。式 (4.6) をたわみ曲線の微分方程式

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{1}{EI} M(x) \quad (E: \text{駆動梁のヤング率}, I: \text{駆動梁の断面 2 次モーメント}) \quad (4.7)$$

に代入すると、

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{1}{EI} \left(M_A + R_A x - \frac{1}{2} w x^2 \right) \quad (4.8)$$

となる。式 (4.8) の両辺を積分すると、

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{EI} \left(M_A + \frac{1}{2} R_A x - \frac{1}{6} w x^2 \right) x + C_1 \quad (C_1: \text{積分定数}) \quad (4.9)$$

となり、もう一度積分すると、

$$y = -\frac{1}{EI} \left(M_A + \frac{1}{2} R_A x - \frac{1}{6} w x^2 \right) x^2 + C_1 x + C_2 \quad (C_2: \text{積分定数}) \quad (4.10)$$

となる。境界条件より、 $x = 0, l$ のとき $\frac{dy}{dx} = 0, y = 0$ となるので、式 (4.9)、式 (4.10) より、

$$\begin{cases} 0 = C_1 \\ 0 = -\frac{1}{EI} \left(M_A + \frac{1}{2} R_A l - \frac{1}{6} w l^2 \right) l + C_1 \\ 0 = C_2 \\ y = -\frac{1}{EI} \left(M_A + \frac{1}{2} R_A l - \frac{1}{6} w l^2 \right) l^2 + C_1 l + C_2 \end{cases} \quad (4.11)$$

となる。式 (4.11) を解くと、

$$\begin{cases} C_1 = C_2 = 0 \\ R_A = \frac{1}{2} w l \\ M_A = -\frac{1}{12} w l^2 \end{cases} \quad (4.12)$$

となる。式 (4.5) と式 (4.12) を式 (4.10) に代入して整理すると、

$$y = \frac{1}{24EI} \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b}{2g_0^2} V^2 \right) (l^2 x^2 - 2lx^3 + x^4) \quad (4.13)$$

となる。ここで、 w は y の関数ではあるが、簡単のために $g = g_0$ であると仮定した。また、駆動梁の断面は長方形なので、断面 2 次モーメント I は、 $I = \frac{1}{12}bh^3$ である。したがって、式 (4.13) は

$$y = \frac{1}{2Eh^3} \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2g_0^2} V^2 \right) (l^2 x^2 - 2lx^3 + x^4) \quad (4.14)$$

となる。これが、駆動梁のたわみ式である。この式から、駆動梁の幅 b は変位に影響しないことがわかる。さらに x について整理すると

$$y = \frac{1}{2Eh^3} \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{2g_0^2} V^2 \right) \left\{ \left(x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} \right\}^2 \quad (4.15)$$

となる。式中の $\left\{ \left(x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} \right\}^2$ の項に注目すると、 $x = \frac{l}{2}$ すなわち駆動梁の中央で変位 y が最大となることがわかる。

4.1.3 プルイン電圧の検証

静電引力を用いる場合に注意しなければならないのは、駆動対象と電極の距離が近づくにつれて静電引力が大きくなるということである。したがって、電位差を大きくしすぎると、静電引力で近づく⇒距離が近くなり静電引力が大きくなる⇒さらに近づく・・・といった形で、雪だるま式に変位量が大きくなってしまふ恐れがある。この現象はプルインと呼ばれ、過度の静電引力で構造が破壊したり、構造が電極に貼り付いてしまうスティッキング¹が生じたりするなど、不可逆変化の主要因となっている。解析モデル Fig. 4.2 におけるプルイン条件について検証する。まず、駆動梁の復元力を考える。式 (4.15) より、 $x = l/2$ の変位 y_{\max} は、

$$y_{\max} = \frac{wl^4}{384EI} \quad (4.16)$$

である。つまり、この梁は力 $F = wl$ で変位 $y_{\max} = wl^4/384EI$ を生じる「ばね」と言い換えることができる。したがって、フックの法則 $F = ky$ より、駆動梁のばね定数 k は

$$k = F/y_{\max} = wl \cdot \frac{384EI}{wl^4} = \frac{384EI}{l^3} \quad (4.17)$$

¹MEMS のような微小な構造体では、表面張力も無視できない場合がある。構造同士が接触した時、表面状態や接触面積によっては、バネの復元力でははがせないような表面力が生じることがある。このような現象が、MEMS におけるスティッキング (sticking, stiction) である。

と表すことができる。以上より、駆動梁で生じる復元力 F_r は、 $x = l/2$ の梁の変位を y とすると、

$$F_r = ky = \frac{384EIy}{l^3} \quad (4.18)$$

となる。また、梁の変位が y の時の静電引力 F_s は、

$$F_s = wl = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r bl}{2g^2} V^2 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r bl}{2(g_0 - y)^2} V^2 \quad (4.19)$$

となる。プルイン現象は、電圧を大きくしていき、梁が電極に近づいていったとき、静電引力が復元力よりも大きくなってしまった場合に発生する。この時の電圧 V_p と、プルイン現象が生じる最小の変位 y_p は、次の 2 式を解くことで求めることができる [68].

$$\begin{cases} F(y) = F_r - F_s = 0 \\ \frac{\partial F(y)}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

書き換えると、

$$F(y) = ky - \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r bl}{2(g_0 - y)^2} V^2 = 0 \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial F(y)}{\partial y} k - \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r bl}{(g_0 - y)^3} V^2 = 0 \quad (4.22)$$

となる。式 (4.22) より、

$$V^2 = \frac{k(g_0 - y)^3}{\varepsilon_0\varepsilon_r bl} \quad (4.23)$$

となる。これを式 (4.21) に代入して整理することで、

$$y = g_0/3 \quad (4.24)$$

が求められる。これより、プルイン現象が生じる最小の変位 y_p は、初期ギャップの $1/3^2$ であることが導出できた。また、式 (4.23, 4.24) より、プルイン電圧 V_p は、

$$V_p = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\varepsilon_0\varepsilon_r bl}} \quad (4.25)$$

と求められた。ここで留意すべきこととして、静電引力の導出では平行平板を仮定したが、実際には駆動梁は式 (4.14) のような曲線状に変形する。そのため、ある電圧 V を

²この条件は、静電引力を利用する MEMS で注意すべき基本的な条件として知られている。

印加した時の実際の静電引力は、想定よりも小さくなると推測される。したがって、ここで導出したプルイン条件は、安全側に見積もられていることになる。

導出した駆動梁のたわみ式及びプルイン条件を参考に、本研究で製作する Au 駆動梁の変形量の見積もりを行った。4.2 節で示す製作工程の実現可能性を考慮し、駆動梁の Au 膜厚は $0.3 \mu\text{m}$ に設定した。解析モデルの各パラメータは文献値を参考に Table 4.1 のように設定した [74]。

Table 4.1: 解析で使用した物理定数の値 [74]

物理定数	-
真空の誘電率 ϵ_0 [F/m]	8.854×10^{-12}
空気の比誘電率 ϵ_r [-]	1.000586
Au のヤング率 E [N/m ²]	82×10^9

本研究では、電極間にギャップを設けるために、厚さ $50 \mu\text{m}$ のポリイミドテープを用いたため、透明基板と駆動梁の初期ギャップ g_0 は $50 \mu\text{m}$ に設定した。式 (4.24) のプルイン条件より、最大変位 y_{max} は $16.7 \mu\text{m}$ 以下になるように注意する必要がある。実際にほしい変位量は、Au 膜厚の 1~2 倍程度で十分なので、駆動梁が設計通りに駆動すれば、プルインの心配はないと考えられる。実用化を想定し、印加電圧 15V を最大の駆動電圧と想定した場合、式 (4.16) より、梁の長さを $500 \mu\text{m}$ にすることで y_{max} が $0.35 \mu\text{m}$ となる。また、この時のプルイン電圧は、式 (4.25) より 68.8V と見積もられた。梁の長さ l を $500 \mu\text{m}$ とした場合の、復元力と静電引力の関係をグラフ化すると、Fig. 4.3 のようになる。グラフより、プルイン電圧 68.8V で復元力と静電引力のグラフが接し、それ以上の電圧になると交わらなくなることがわかる。また、プルイン電圧の接点は、初期ギャップの $1/3$ の $16.7 \mu\text{m}$ にあることが確認できる。

4.1.4 動作周波数の解析

静電駆動方式の動作周波数の見積もりを行った。印加電圧の信号の速度に対して、機械的な変形速度のほうが遅いと考えられるので、梁の固有振動数を動作周波数と見なすのが適当と考えられる。変形量の解析と同様に、駆動梁を両端固定梁とみなす。駆動梁の幅を b 、厚さを h とすると、両端固定梁の一次モードの固有振動数 f_n は以下の式で表される [75]。

$$f_n = \frac{k_1^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (4.26)$$

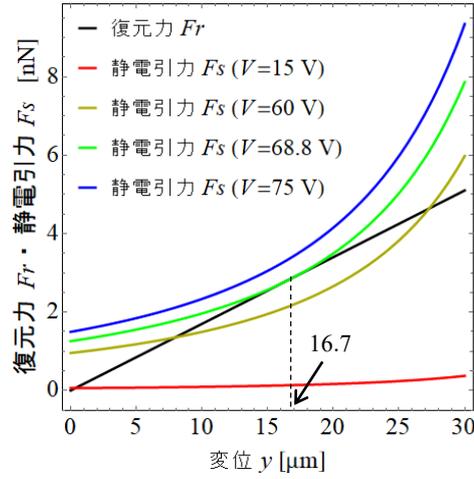


Figure 4.3: 復元力と静電引力の関係. ただし, 初期ギャップ $50 \mu\text{m}$, 梁の長さ $l=500 \mu\text{m}$.

ただし, k_1 は 1 次モードの固有値, E は Au のヤング率, ρ は Au の密度, I は駆動梁の断面 2 次モーメント, A は駆動梁の断面積である. 駆動梁の断面は長方形のため, $A = bh$, $I = \frac{1}{12}bh^3$ であることから, 式 (4.26) は次のように書き換えることができる.

$$f_n = \frac{k_1^2 h}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho}} \quad (4.27)$$

この式より, 応答速度についても駆動梁の幅 b の影響を受けないことがわかる. 駆動梁の長さ l を $500 \mu\text{m}$, Au の厚さ h を $0.3 \mu\text{m}$ と設定した時, 式 (4.27) に Table 4.2 に示した値を代入することで, 駆動梁の固有振動数 $f_n = 2.53 \times 10^3 \text{ Hz}$ が導出された. したがって, 静電駆動方式 BRM の動作周波数も同程度と見積もることができた.

Table 4.2: 解析で使用した物理定数の値 [74]

物理定数	-
両端固定梁の一次モードの固有値 k_1 [-]	4.72
Au のヤング率 E [N/m^2]	82×10^9
Au の密度 ρ [kg/m^3]	19.3×10^3

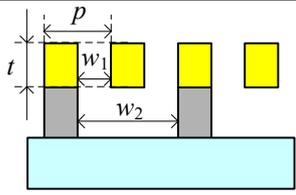
4.2 製作と評価

4.2.1 2次元グレーティングの3層近似理論計算による検証

2.3.1 項で提案した，BRMを3層のグレーティングで近似する考え方で，静電駆動方式BRMの複屈折可変特性の見積もりを行う．グレーティングの寸法は，4.2節で示す製作工程の実現可能性を考慮してTable 4.3のように設定した．

波長及び変位量に対する，静電駆動方式BRMの位相差の近似理論計算結果をFig. 4.4にまとめた．スリット幅の設計値が波長スケールとほぼ同等のため，全体的に位相差は小さい値となっている．位相差の変化量は，長波長でより大きくなる傾向があり，波長 $0.633\ \mu\text{m}$ において $14.6^\circ(45.1^\circ \sim 30.5^\circ)$ 程度得られることが見積もられた．

Table 4.3: 理論計算で使用したグレーティング寸法



寸法パラメータ	設計値
Au 厚さ t	$0.3\ \mu\text{m}$
スリット幅 w_1	$0.5\ \mu\text{m}$
グレーティング周期 p	$0.8\ \mu\text{m}$
$w_2 = p + w_1$	$1.3\ \mu\text{m}$

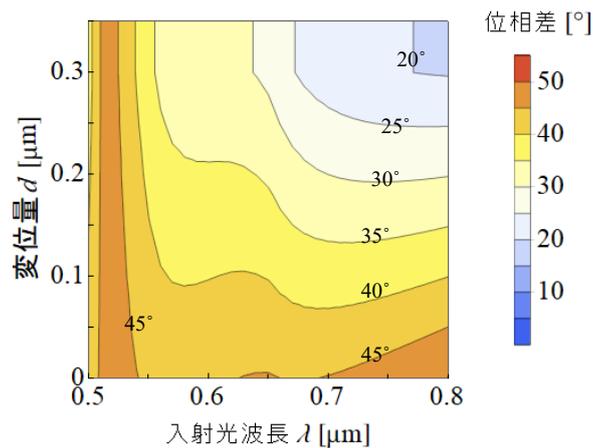


Figure 4.4: 波長及び変位量に対する，静電駆動方式BRMの位相差の近似理論計算結果．グレーティング寸法はTable 4.3に記載．

4.2.2 製作

静電駆動方式の面外駆動型 BRM の製作工程を Fig. 4.5 に示す。

まず、犠牲層の選択について述べる。MEMS デバイスの製作において、犠牲層をエッチングして自立構造をリリースする場合、最も一般的なのは SiO_2 層をフッ酸でエッチングする工程である。これは、MEMS デバイスが、半導体加工に倣って Si 基板をベースとして加工されることが多いためである³。しかしながら、サブミクロン構造では表面張力が無視できず、隣接する梁や基板に付着して離れなくなってしまう「スティッキング」が生じる恐れがある。これを防ぐための改善策として、フッ酸を蒸発させて気相エッチングを行う工程が提案され、現在は装置化もされている。しかし、本素子を提案した段階では、蒸気フッ酸エッチングは装置化されておらず、扱いに危険が伴うことと、温度及び湿度の管理が難しく制御が困難である点から、利用を断念した。

そのため、別の手段として、Si を XeF_2 ガスでドライエッチングする工程を採用した。Si ガスエッチング工程は、既に装置化されていたことと、昇華によりガス化するエッチングガスを用いるので表面張力によるスティッキング発生の心配がないことの 2 点から、蒸気フッ酸工程を採用するよりも製作が安定すると思った。以上より本研究では、製作工程の実現性を優先して、Si を犠牲層として使用することとした。また、試作 BRM は、ガラス基板上に製作することにした。

考案した製作工程に従って、BRM の試作を行った。グレーティングは、Table 4.3 に示した寸法と同様の値を用いて設計した。また、グレーティング長さ $l_g=50 \mu\text{m}$ 、Au 自立膜を含む全体の長さ $l=500 \mu\text{m}$ と設定した。

以降は、具体的な製作について説明する。

(a) スパッタリング成膜及び EB 描画パターンニング

20 mm 角の石英ガラス基板 (有水合成, 厚み 0.5 mm, 石本商會) を、Table 3.6 に示した有機洗浄手順で洗浄し、表面の汚れを除去した。その後、スパッタリング装置 (NFTS-3S-R0601, FTS) を使用して、犠牲層 Si, 接着層 Cr, Au, エッチングマスク用の Si を成膜した。それぞれの膜の設計膜厚及び成膜時間を Table 4.4 に示す。成膜時の条件は、Table 3.3 に記載した条件を使用した。

³Si 基板を熱酸化して表面に SiO_2 層を形成した基板の上に、構造を製作している手法が一般的である。あるいは、自立膜型の MEMS デバイスの製作には、Si 基板表面に SiO_2 層と Si デバイス層が形成されている、SOI (Silicon on Insulator) 基板などが用いられる。

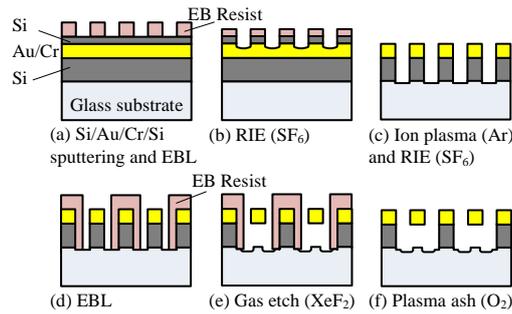


Figure 4.5: 静電駆動方式の製作工程. (a) スパッタリング成膜により, 下から, 犠牲層 Si, 接着層 Cr, Au, エッチングマスク用の Si を成膜した. その後, EB 描画で BRM 構造をパターンニングした. (b) EB レジストをマスクとして, SF_6 ガスを用いた RIE で上層の Si 層をエッチングした. (c) Ar プラズマ RIE により, Au 層をエッチングした. その後, エッチングガスを SF_6 に切換えて, RIE により Si 犠牲層をエッチングした. (d) 重ね EB 描画を行い, 工程 (a) の BRM パターンの固定梁にあたる部分をレジストパターンで保護した. (e) 緩衝フッ酸 (BHF) に浸漬し, Si 犠牲層表面の酸化膜を除去してから, BRM の駆動部分の下にある Si 犠牲層を XeF_2 ガスエッチングで除去し, 駆動構造をリリースした. (f) 最後に, O_2 プラズマアッシングで, レジスト保護膜を除去した.

Table 4.4: スパッタリング成膜条件

-	設計膜厚	成膜時間
下層 Si(犠牲層)	0.5 μm	12.4 min
Cr(接着層)	0.005 μm	0.5 min
Au	0.3 μm	21.1 min
上層 Si(マスク層)	0.15 μm	3.6 min

成膜後, EB 描画装置 JBX-6300FS(JEOL) を使用して EB 描画を行った. EB レジストは, ポジ型の gL2000-14 を使用した. 作業工程は Table 3.1, 3.2 に記載した通りに実施した. 露光量は, $300 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ とした. レジスト塗布時のスピコート回転数は, 5000 rpm で 60 sec 実施した. 描画する際に使用した 2 次元 CAD 図面を Fig. 4.6 に示す. 駆動梁の両端を自立膜形状にすることで, 駆動部分の長さ l を確保しつつ, グレーティング部分が比較的平坦になるように配慮した. 自立膜には, 下層の Si を効率良く除去するため, ガスエッチング進行を促すホールアレイパターンを配置した. また, 図中では省略したが, のちの工程 (d) で重ね EB 描画を行うために, 位置合わせ用のマーク

(アライメントマーク) を試料端部に描画した。

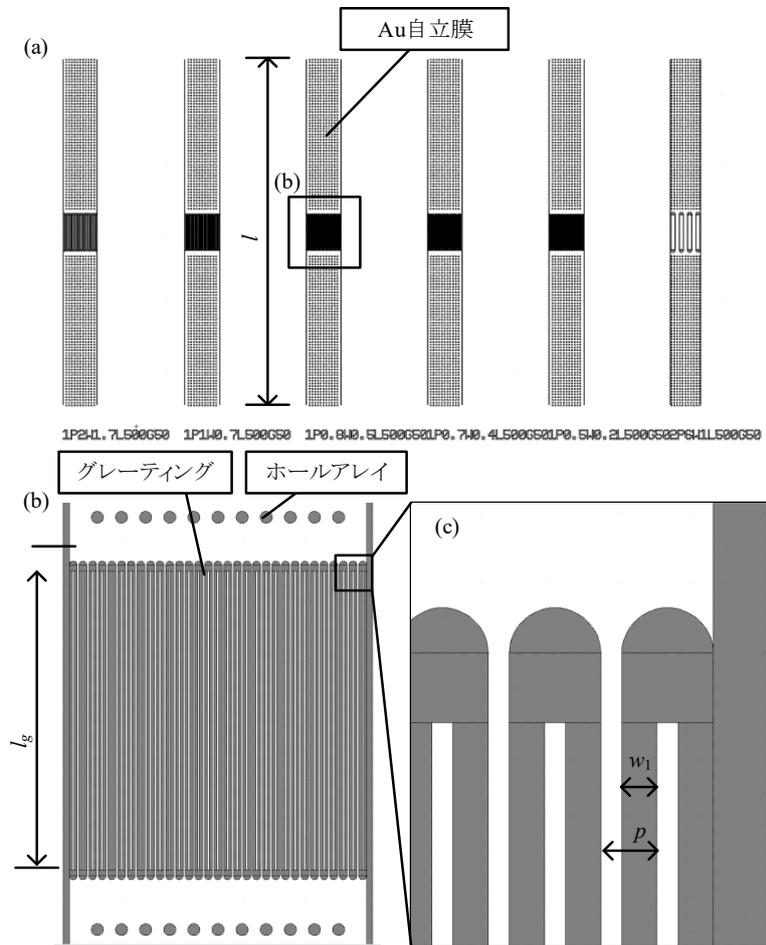


Figure 4.6: EB 描画で使用した 2 次元 CAD 図面。黒い部分が実際に露光される部分。(a)BRM 全体図。(b) グレーティング部分の拡大図。(c) 駆動梁と Au 自立膜の接続部分。

(b), (c) RIE を用いたエッチングマスク Si 層及び Au 層のエッチング

EB レジストパターンをマスクとして、次の工程でマスク層として利用する Si 層の RIE を行った。エッチングガスは SF_6 を使用し、エッチング条件は Table 3.4 に示す条件を用い、24 sec エッチングを行った。

続いて、工程 (b) でパターンニングした Si 層をマスクとして、Au 層及び接着層 Cr の RIE を行った。エッチングガスは Ar を使用し、18 min 行った。

(d) 重ね EB 描画による固定梁下層 Si の保護

工程 (a) で描画しておいたアライメントマークを使用して、重ね EB 描画を行った。描画の際に使用した 2 次元 CAD 図面を Fig. 4.7 に示す。ポジ型レジストは露光された部分のレジストが現像で溶解するので、駆動部分だけが露出し、それ以外の部分がレジストで覆われる。

グレーティング構造のある基板表面をレジストで覆う必要があるため、工程 (a) と同じポジ型レジスト gL2000 をアニソールで希釈し、粘度を下げて塗布する予備実験を行った。レジストとアニソールを体積比 1:1 で混合することで、スリット幅が $0.5 \mu\text{m}$ 以上であればスリット内部にレジストが浸透することがわかった。そのため、試作においても同条件で希釈したレジストを用いて、描画を行った。

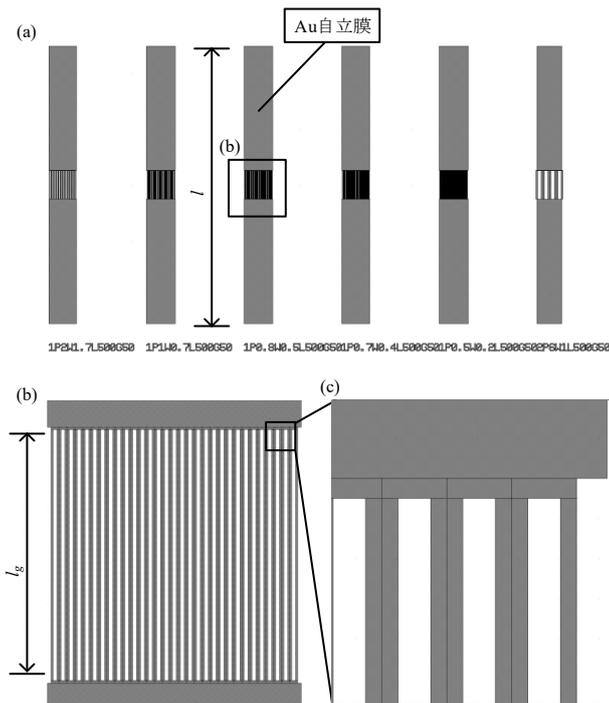


Figure 4.7: 重ね EB 描画で使用した 2 次元 CAD 図面。黒い部分が実際に露光される部分。(a)BRM 全体図。(b) グレーティング部分の拡大図。(c) 駆動梁と Au 自立膜の接続部分。

(e) XeF₂ ガスエッチングによる犠牲層除去

予備実験において、XeF₂ ガスエッチングを行っても犠牲層が完全に除去されず⁴、表面の膜形状だけが残る現象が確認された。そこで、緩衝フッ酸 (BHF) に浸漬する工程を追加したところ、犠牲層が完全に除去されるように改善された。そのため、試作では、XeF₂ ガスエッチングを行う前に、試料を BHF に浸漬して Si 表面の酸化膜除去を行った。BHF に 30 sec 浸漬し、その後 30 sec の純水リンスを 2 回行った。続いて、XeF₂ ガスエッチングを行った。エッチングサイクル数を 5 回実施し、エッチングの進行を確認するため、実施後の試料を裏側からデジタルマイクロスコープ (落射光) で観察した。観察像を Fig. 4.8 に示す。パターンの存在する部分は反射光が明るく、対してパターンのない部分は、やや Si の色に近く暗い反射光が観察できた。このことから、Au 自立膜はリリースされたと判断し、エッチング工程を終了した。

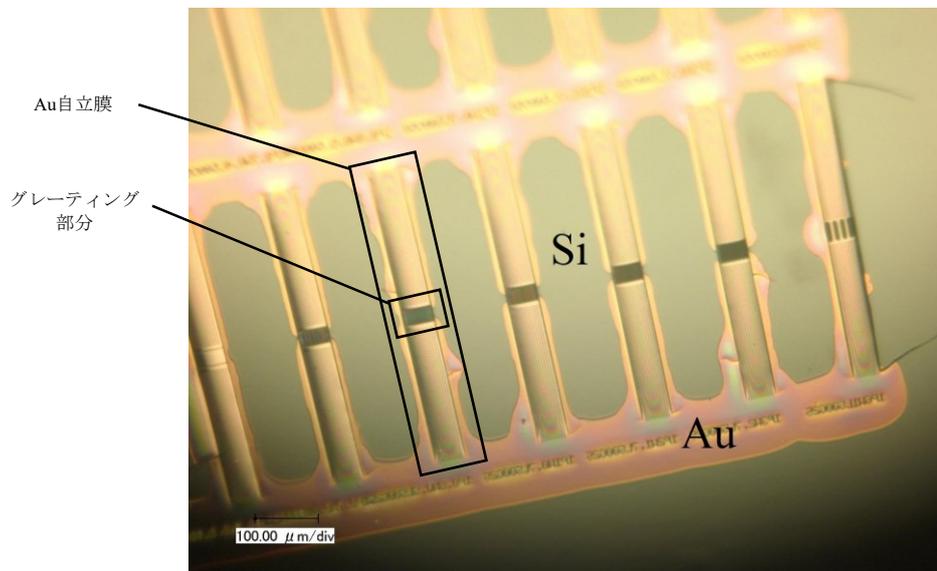


Figure 4.8: XeF₂ エッチング後に基板を裏側から観察した際の光学顕微鏡像。灰色の部分が、犠牲層エッチング後に残った Si 層。

(f) O₂ アッシングによるレジスト除去

最後に、自動アッシング装置 FA-1 を用いて、O₂ アッシングによるレジスト除去を行った。装置の標準条件で 5 min 実施し、試料表面の Au が露出されていることを確認した。

⁴のちの検証により、RIE 工程で Si 犠牲層を露出させてから犠牲層エッチングを行うまでの時間をできるだけ短くすることにより、表面酸化の影響を回避できる可能性が示唆された。

形状評価

試作した BRM の形状評価を行った。まず、SEM 観察像を Fig. 4.9(a) に示す。Au 自立膜及びグレーティングがパターン通りに形成できている。続いて、グレーティング部分をレーザ顕微鏡 VK-X 250(KEYENCE) で観察した。Fig. 4.9(b),(c) に示すように、梁構造が破損することなく配置されている。また、駆動梁と非駆動梁がパターン通りに交互に配置されていることが確認できた。Fig. 4.9(b) に示す赤線 A-A' の高さプロファイルを、Fig. 4.9(d) に示す。試作した BRM は、スリットに対して垂直な方向に、上向きに湾曲していることがわかった。この湾曲は、スパッタリング成膜時の残留応力によるものと考えられる。また、素子中央部の初期変位は約 $0.6 \mu\text{m}$ であることが明らかとなった。

4.2.3 複屈折特性の評価

静電引力印加による位相差変化の測定を行った。静電引力を BRM に垂直方向に印加するために、BRM 上部に透明電極基板を設置した。電極には、可視光に対して透明なインジウム酸化スズ (ITO) 製の基板 (厚み 1.8 mm) を使用した。厚さ $50 \mu\text{m}$ のポリイミドテープを試料基板上に貼りつけることで、BRM と透明基板との間にギャップを設けた。BRM の Au 層と透明基板に導線を接続し、ソースメータ 2410(KEITHLEY) に接続した。ソースメータは定電圧源として使用し、電圧の印加及びリーク電流の監視を行った。駆動梁の初期変位ができるだけ小さいほうが位相差の変化を観察しやすいと考え、初期の変形量が最も小さい領域 (Fig. 4.9(b) に示す白丸部分) で測定を行った。20 倍対物レンズとコア径 $50 \mu\text{m}$ の光ファイバを使用し、測定スポットを $2.5 \mu\text{m}$ に設定した。本測定では、検光子角度 10° 毎に $0^\circ \sim 180^\circ$ までの透過光強度を取得した。

BRM に $0 \sim 700 \text{ V}$ の電圧を印加した時の、入射光波長 $0.633 \mu\text{m}$ における位相差及び TE, TM それぞれの透過率の変化を Fig. 4.10 に示す。印加電圧 $0 \sim 200 \text{ V}$ の範囲で、電圧の印加に伴って位相差が増加した。この時の位相差変化量は $25.3^\circ (21.5^\circ \sim 46.8^\circ)$ に達した。Fig. 4.9(d) に示すように、測定したスポットの梁の初期変位はマイナスであったため、 $0 \sim 200 \text{ V}$ の範囲では、グレーティングの実効厚さが増加したと推測される。最大の位相差 46.8° が、初期位相差の見積もり 45.1° に近いことから、この推測は妥当と思われる。 $200 \sim 500 \text{ V}$ の範囲では梁の変位が正の領域となり、実効厚さが徐々に減少したことにより、位相差も減少傾向となったと推測される。しかし、 500 V を超える範囲では、位相差は再び上昇傾向となった。この現象は次のように解釈した。試作した BRM は、リリース時に凸形状に湾曲してしまった。この凸構造に電圧を印加すると、梁は鉛直に上昇するだけでなく、静電引力の不均一性によって曲げられると考えられる。そ

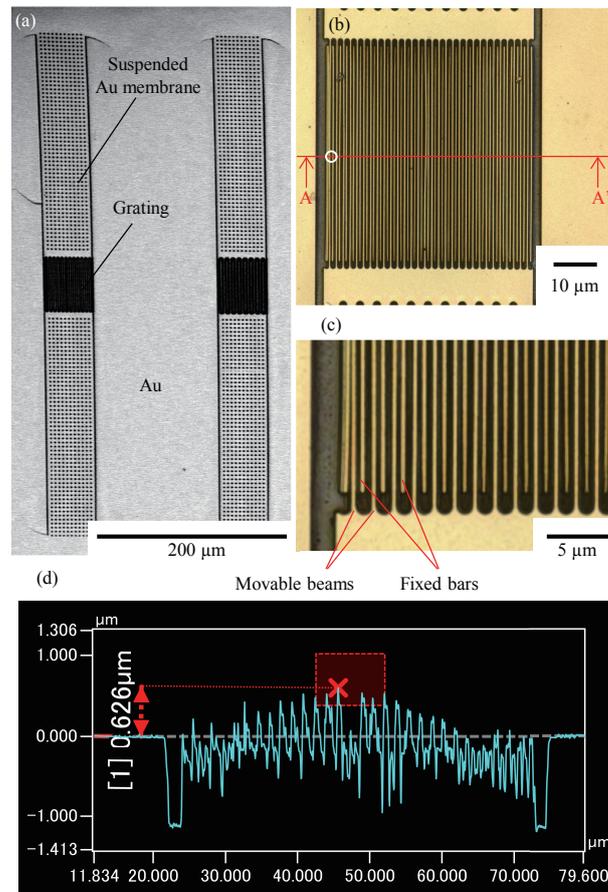


Figure 4.9: (a) 試作した BRM の SEM 観察像. (b, c) レーザ顕微鏡による観察像. グレーティング部分 (b) 及び駆動梁の根元部分の拡大図 (c). 本試作の位相差測定は、白い丸で示したスポットで実施した. (d) レーザ顕微鏡で測定した、(b) に示す赤線 A-A' の 2 次元高さプロファイル.

の結果、0~500 V の範囲では素子端部の梁は鉛直に引張り上げられ、500 V~700 V の範囲では、素子端部の駆動梁がデバイス中心に向かう方向に変形し、スリット幅が狭くなったと推測される。第 2 章で述べたように、Au ナノグレーティングで発生する複屈折特性は、スリット幅に強く依存するため、500 V~700 V の範囲では位相差が上昇傾向になったと考えられる。

振幅透過率は、TE, TM いずれもほとんど変化しなかった。位相差特性への寄与の増加は、エネルギーの損失の増加につながるため、位相差の増加に伴って透過率は減少すると推測される。今回の測定結果は、この推測と逆方向の傾向となった。これについてさらに検証するためには、SEM を用いて電圧印加時の変形状態を確認する等、変形の評

価を行う必要があると考えられる。本試作では、数百 V という高電圧を要した上、700 V 印加の再実験中に破損し、動作不能となったため、SEM 内での観察は行わなかった。破損前に、レーザ顕微鏡を用いた電圧印加時の変形の測定も試みたが、透明基板の下にある BRM に焦点を合わせることが困難だったため、本試作で電圧印加時の変形状態を観察することはできなかった。

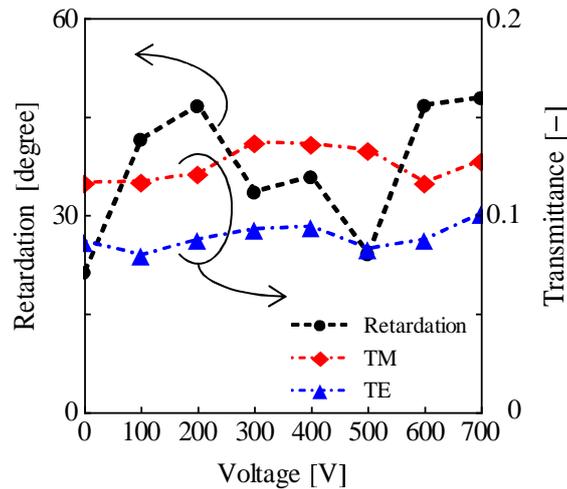


Figure 4.10: BRM に静電引力を印加した時の、位相差及び TE, TM それぞれの透過率の測定結果。入射光波長は $0.633 \mu\text{m}$ 。

初期変形量と位相差の関係の調査

Fig. 4.11(a) に示す別の試作 BRM を使用し、初期変形量と位相差の関係を調査した。この素子は、前述の試作と同一基板上で、同一の製作工程を経て製作されたもので、設計寸法も同一である。二次試作素子は、一次試作素子の電圧印加測定時に、同一の電圧が印加されているが、700 V 印加時にも破損しなかった。しかし、一次試作素子と同様に素子端部の駆動梁が固定梁側に変位し、スティッキングが生じた (Fig. 4.11(b))。これにより、二次試作素子の初期変形量は、一次試作素子よりも大きな値を示した (Fig. 4.11(c))。

この二次試作素子を利用して、電圧を印加しない状態で Fig. 4.11(a),(c) に示す点 A~G での位相差の測定を行った。この測定では、50 倍対物レンズとコア径 $200 \mu\text{m}$ の光ファイバを使用したため、スポット径は $4 \mu\text{m}$ であった。点 A の測定スポットを Fig. 4.11(a),(b) に白丸で示しており、他の点も同一のスポット径で測定した。レーザ顕微鏡の高さプロファイルから取得した各点での変位を横軸に取り、縦軸に各点の位相差を記

述べたのが Fig. 4.11(d) である. 点 A において, 一次試作素子と比較して大きな位相差が測定されたが, これは Fig. 4.11(b) に示すスティッキングによるスリット幅の狭小化によるものと推測される. また, 変位が初期のグレーティング厚さ $0.3 \mu\text{m}$ を超えた点 C~F で位相差が収束した. この領域は, 3 層近似における $t < d$ の状況にあたり, 構造の変位によって位相差が変化しなくなる領域である. したがって, 変形量が大きくなり, 実効厚さが定義できない領域では, 位相差の変化は生じないということが, 実験的に実証された.

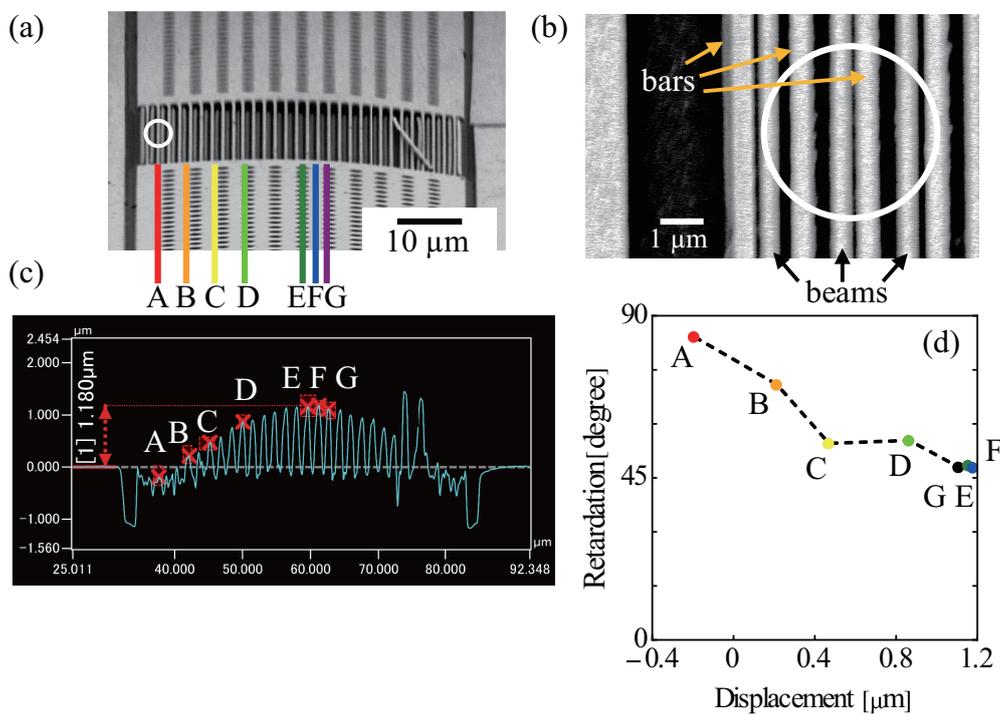


Figure 4.11: (a) 二次試作素子を斜め上から俯瞰した SEM 観察像. グレーティング構造が凸形状に湾曲していることが確認できる. 位相差の測定は, 図中に占める A~G の各点で行った. 図中の白丸は, 点 A の測定スポットを示している. (b) 二次試作素子の測定点 A 付近を拡大した SEM 観察像. 図中の白丸は, 点 A の測定スポットを示している. (c) レーザ顕微鏡で測定した, 二次試作グレーティング横断面の 2 次元高さプロファイル. (d) 図 (a) に示した各測定点での初期変形量に対する, それぞれの位相差の測定結果. 初期変形量は, レーザ顕微鏡の高さプロファイルから取得した. 入射光波長は $0.633 \mu\text{m}$.

4.3 考察

位相差変化特性に関する考察

今回試作した静電駆動方式 BRM の位相差変化量は、波長 $0.633 \mu\text{m}$ において、 25.3° ($21.5^\circ \sim 46.8^\circ$) であった。この値は、近似計算によって求めた 14.6° ($45.1^\circ \sim 30.5^\circ$) に比較的近い値となった。特に、初期位相差と推測される測定値 46.8° が、計算値 45.1° に近い値を示したことから、グレーティングで生じる初期位相差の概算については概ね信頼できることが分かった。変形に対する位相差変化の見積もりについては、4.2.3 節でも述べた通り、試作した素子の挙動がやや複雑となったため、妥当性を判断することは難しい。

続いて、印加電圧について考察する。試作では、 $0 \sim 500 \text{ V}$ で想定の外駆動が生じたと考えられるが、この値は設計時の想定に対して非常に大きな値である。この原因は2つ考えられ、特に影響が大きいと考えられるのが、BRM と透明電極基板のギャップの固定方法である。電圧印加試験は、試料に厚み $50 \mu\text{m}$ のポリイミドテープを貼付け、その上に透明基板を置くだけの簡易的な実験系で実施した。そのため、実際に測定した BRM と透明基板のギャップ距離が、想定 of $50 \mu\text{m}$ になっていなかった可能性がある。機械的設計の項で示したように、静電引力は電極間の距離に強く依存する。式 (4.16) より、 500 V で約 $0.3 \mu\text{m}$ の変形が生じる時のギャップを計算すると、約 1.8 mm となった。これより、実験時の正確なギャップは確認できていないが、想定以上の電圧印加が必要になったと推測される。また、Passchen の法則より、大気中のマイクロギャップの金属電極間に 300 V 以上の直流電圧を印加すると、ギャップによらず放電する。したがって、試作の破損の要因は放電による絶縁破壊の可能性が考えられる。

想定以上の印加電圧を要したもう一つの原因として、Au 自立膜が凸形状に湾曲してしまったことが挙げられる。機械的設計は、平行平板を想定して計算を行ったが、凸形状の場合、鉛直方向の曲げ剛性が平板よりも強くなると推測される。

以上の2つの要因から、想定以上の電圧印加が必要になったと考えられる。設計に近い電圧印加が実現できれば、素子の破損は避けることができる。

内部応力の調整による湾曲の低減の検証

リリース時の素子の湾曲は、スパッタリング成膜時に残留する内部応力によるものであると推測される⁵。内部応力は、成膜時の温度管理や各膜の厚みの調整によって除去

⁵ 薄膜の内部応力は、基本的に膜の界面と平行な方向の応力だけを考える。その理由は、基板の拘束によって膜の体積変化が十分に起こらないことが内部応力の要因だからであり、膜の鉛直方向には拘束するものがないので、内部応力が残留しない(自由に体積変化できる)と考えることができる [76, p.349].

もしくは相殺することができる [77, 78]. したがって, 本研究においても, 応力を考慮した膜厚の設定および成膜条件の改善によって, 湾曲を抑えることができると考えられる (Fig. 4.12(a),(b)). 本研究で利用した諸条件でスパッタリング成膜した Si 膜には, 強い圧縮応力が残留している可能性があることが, 別の予備実験によって示唆された. 同様に, 金属のスパッタリング成膜においては, 主に引張の応力が残留することがわかった. そこで, Si 犠牲層の設計膜厚を調整することで, 内部応力を低減できるか検証を行った. 20 mm 角の石英ガラス基板に対して, 試作と同じ成膜条件で, Au/接着層 Cr/Si のスパッタリング成膜を行った. Au 及び接着層 Cr の膜厚は変えずに, Si 膜厚のみ 0.1~0.4 μm の異なる条件で成膜した試料を作製した. 触診段差計 (DextakXT) による表面形状測定を利用して試料基板の曲率半径を算出し, 以下に示す Stoney の式 [79] に代入することで, 薄膜の内部応力 σ を算出した.

$$\sigma = \frac{E_s t_s^2}{6(1 - \nu_s) R t_f}$$

ただし, E_s は基板のヤング率, t_s は基板の厚さ, ν_s は基板のポアソン比, t_f は成膜した膜全体の厚さ, R は基板の反りの曲率半径である.

Si 膜厚による内部応力の違いの測定結果を Fig. 4.12(c) にまとめた. このように, Si 膜厚を変えるだけで基板に残留する内部応力を調整できることがわかった. ただし, Si 犠牲層を薄くしすぎてしまうと, リリース後の自立膜が基板に貼り付いてしまうスティッキング現象が発生する危険性がある. この結果を元に各膜厚を調整し, 最適な条件を探索することによって, リリース後の湾曲の問題を解決できると考えられる.

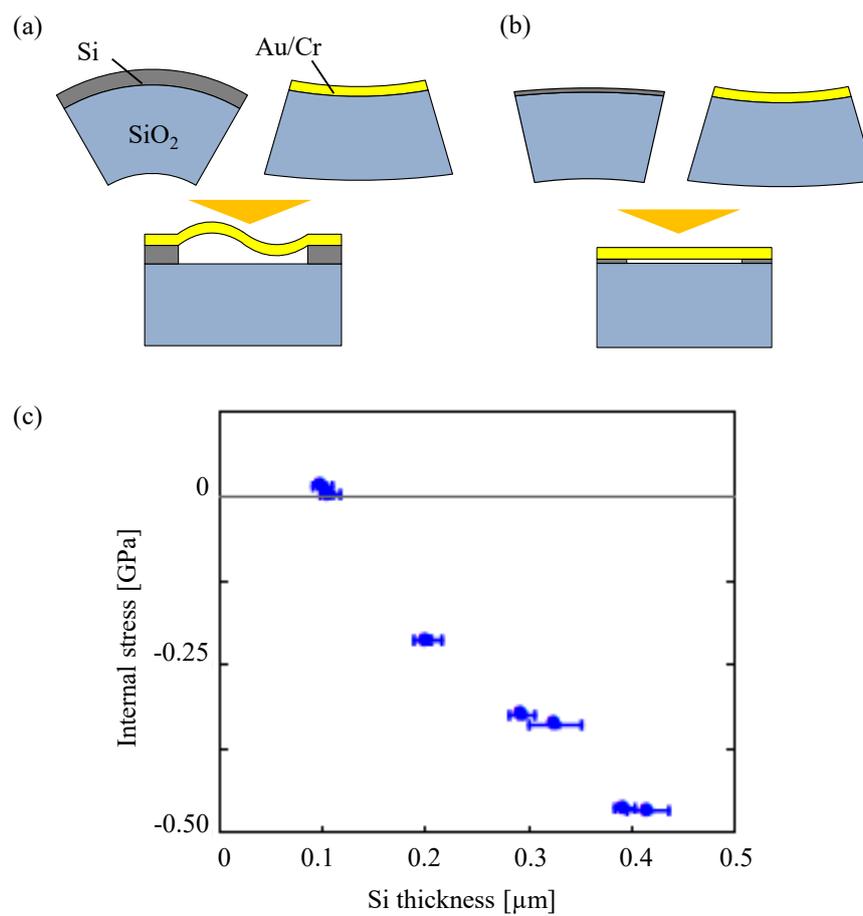


Figure 4.12: (a) (b) Si 膜厚の違いによる内部応力を調整する手法の概略. (c) Si 膜厚による内部応力の違いの測定結果.

4.4 本章のまとめ

静電駆動方式の面外駆動型 BRM の設計及び製作工程を考案し、試作を行った。試作した素子に 0~700 V の電圧を印加したところ、0~200 V の範囲において、

- 波長 0.633 μm で、位相差変化量 25.3° ($21.5^\circ \sim 46.8^\circ$) を達成した。

また、二次試作素子を利用した初期変形量と位相差の調査により、

- 変位によって位相差が変化することを実験的に確認することができた。

以上の結果により、静電駆動方式 BRM の試作によって、面外駆動型 Au ナノグレーティングによる複屈折可変メタサーフェスの実証に成功した。

静電駆動方式の面外駆動型 BRM の課題は、以下の 3 つである。

- 製作工程で残留した応力で、Au 自立膜が湾曲してしまう。
- 必要な電圧印加が想定よりも大きい。
- 実証した複屈折位相差変化量は最大 25.3° であった。

一点目は、製作工程の改善によって解決できると考えられる。また二点目の課題は、透明電極の固定方法の改善で解決することができる。これらの改善を行うことで、静電駆動方式 BRM の複屈折可変特性が向上すると考えられる。三点目の課題については、製作工程の影響でスリット幅を小さくできないことが一番の要因である。これを解決するためには、新たな工程を考案するか、面外駆動方式を再考する必要がある。

次章では、もうひとつのコンセプトであった電熱駆動方式の実験的実証について述べる。

第5章

電熱駆動方式の面外駆動型 BRM

本研究では，Au ナノグレーティングを構成する Au 梁を面外方向に駆動させ，実効厚さを制御する手法を考案した．第4章では，駆動手法として静電駆動を適用し，実験的な検証を行った．本章では，もうひとつのアプローチとして提案した，電熱駆動方式の面外駆動型 BRM の試作と複屈折可変特性の評価について述べる．

5.1 駆動手法の設計

5.1.1 電熱駆動方式 BRM の駆動手法

本研究で提案する電熱駆動方式 BRM の駆動手法について述べる．電熱駆動方式 BRM の概略図を Fig. 5.1 に示す．Au/SiO₂ の両持ちのバイモルフ梁を並べることで，Au ナノグレーティングを構成する．Au の熱膨張係数 ($14.2 \times 10^{-6}/\text{K}$) は，SiO₂ の熱膨張係数 ($7.4 \times 10^{-6}/\text{K}$) と比較しておよそ2倍大きいため [80]，梁は熱膨張によって上方に湾曲すると推測した．温度の制御は，Au 層への通電加熱により行う．電極に導通する梁と，パターンを孤立させることで配線から絶縁された梁とを交互に配置することで，電熱による面外駆動でグレーティングの実効厚さを制御可能になると考えた．

5.1.2 変形量の解析

電熱駆動方式 BRM の試作では，静電駆動方式の試作と同様に製作工程の実現性を優先し，Si を犠牲層として使用することにした．そのため，バイモルフの下層の材料には，XeF₂ ガスに耐性があり，バルクの線膨張率が Au より1桁以上小さい誘電体である SiO₂ を採用することとした．

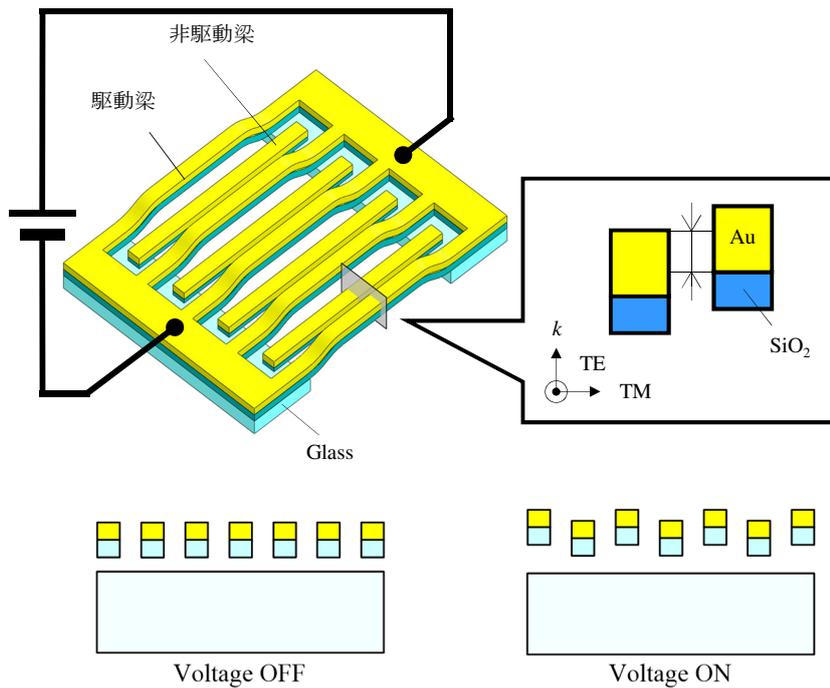


Figure 5.1: 電熱駆動方式の面外駆動型 BRM の概略図.

理論解析

両持ち梁のたわみ式は不静定問題であり，かつバイモルフ構造の場合，理論的な式を立てることは困難である¹．そのため，片持ちのバイモルフ梁の変形量の式導出 [82] を利用して，変形量の概算を行った．以下，膜厚の異なる 2 層から構成される片持ちバイモルフ梁の式を導出する．概算に用いた片持ちバイモルフ梁のモデルを Fig. 5.2 に示す．

ある温度 T_0 で，同じ長さ l ，幅 b の 2 層の板からなるバイモルフ構造を考える．以降，上層を 1，下層を 2 とし，各層のパラメータを添え字で書き分ける．各層の線膨張率 α の大きさは， $\alpha_1 > \alpha_2$ とすると，温度変化 ΔT によって円形に変形する．この時，各層には，熱膨張を拘束する用に軸力 P_1, P_2 が，また，発生する熱応力を一部解放するように曲げモーメント M_1, M_2 が Fig. 5.2 のように作用する． $\Delta T > 0$ の時，層 1 には圧縮の，層 2 には引張りの軸力が働く．外力は働かないので， $P_1 = P_2 = P$ である．また，軸力は距離 $(t_1 + t_2)/2$ だけ離れた偶力として作用するので，断面内のモーメントのつり合いに含まれる．

¹バイモルフ梁あるいは多層膜梁の根元にバネ構造を追加して駆動させる研究はいくつか報告されている [81]．このような構造では，固定端を回転支持とみなして理論式が導出されている．

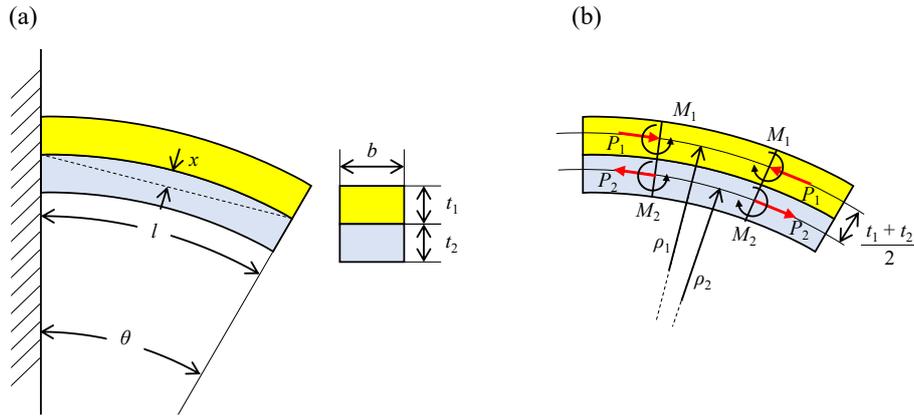


Figure 5.2: 熱応力，軸力，曲げモーメントによる片持ちバイモルフ梁の変形の概略図.

したがって，モーメントのつり合い式は，

$$M_1 + M_2 - \frac{P(t_1 + t_2)}{2} = 0 \quad (5.1)$$

と書ける．ここで，それぞれの層の曲率半径を ρ_1, ρ_2 とすると，

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{M_1}{E_1 I_1} \quad (5.2)$$

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{M_2}{E_2 I_2} \quad (5.3)$$

の関係が成り立つ．ここで，各層の断面2次モーメント $I_{1,2}$ は，各層の中心を通る軸周りで考えるため， $I_{1,2} = bt_{1,2}^3/12$ である．

また，曲率半径は，各層の厚み t_1, t_2 よりも十分に大きいので $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ と近似できる．これより， M_1, M_2 は，

$$M_1 = \frac{E_1 I_1}{\rho} \quad (5.4)$$

$$M_2 = \frac{E_2 I_2}{\rho} \quad (5.5)$$

と書き換えることができる．これらを式 (5.1) に代入して P について整理すると，

$$P = \frac{2(E_1 I_1 + E_2 I_2)}{\rho(t_1 + t_2)} \quad (5.6)$$

と導かれる．

バイモルフを構成する2層は強固に接着されていると仮定すると，各層の接着面は同じ長さである必要がある．したがって，熱ひずみ，軸力及び曲げモーメントによって伸縮した各層の接着面の長さは，等しくなければならない．これより，次の式が求められる．

$$\alpha_1 \Delta T - \frac{P_1}{E_1 t_1 b} - \frac{t_1}{2\rho_1} = \alpha_2 \Delta T + \frac{P_2}{E_2 t_2 b} + \frac{t_2}{2\rho_2} \quad (5.7)$$

これを整理すると,

$$(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T = \frac{t_1 + t_2}{2\rho} + P\left(\frac{1}{E_1 t_1 b} + \frac{1}{E_2 t_2 b}\right) \quad (5.8)$$

の関係が得られる.

ここで, 式を簡単にするために,

$$\begin{cases} A = (\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T \\ B = 2(E_1 I_1 + E_2 I_2) \\ C = t_1 + t_2 \\ D = \left(\frac{1}{E_1 t_1 b} + \frac{1}{E_2 t_2 b}\right) \end{cases} \quad (5.9)$$

と係数を定義する. 式 (5.8) に式 (5.6) を代入して整理すると,

$$A = \frac{C}{2\rho} + \frac{B}{\rho C} D = \frac{C^2 + 2BD}{2\rho C} \quad (5.10)$$

となる. これより,

$$\rho = \frac{C^2 + 2BD}{2AC} \quad (5.11)$$

$$= \frac{3(t_1 + t_2)^2(E_1 E_2 t_1 t_2) + (E_1 t_1 + E_2 t_2)(E_1 t_1^3 + E_2 t_2^3)}{(t_1 + t_2)(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T + 6(E_1 E_2 t_1 t_2)} \quad (5.12)$$

となり, バイモルフ梁の曲率半径 ρ が導出できた². この式より, $\alpha_1 > \alpha_2$ であれば $\rho > 0$ となるため, 正の温度変化を与えられたバイモルフ梁は, 線膨張率の大きい層の方向に湾曲することがわかる. また, バイモルフ梁の幅 b は曲率半径には影響しないことがわかる. 変形したバイモルフ梁を円弧とする扇形の中心角を θ とすると, $\theta = l/\rho$ と求められる. 幾何学的な関係から, 円弧の頂点と円弧の両端を通る直線との距離 x は,

$$\begin{aligned} x &= \rho - \rho \cos \frac{\theta}{2} \\ &= \rho(1 - \cos \frac{\theta}{2}) \end{aligned} \quad (5.13)$$

と求めることができる. 本研究では, この距離 x を両持ちバイモルフ梁の中央の変形量の概算に利用する.

上層の Au 層の厚さ t_1 を $0.4 \mu\text{m}$ とした時, 変形量 x が t_1 程度になるような, 梁の長さ l と下層 SiO_2 の厚さ t_2 を概算した. 温度変化 $\Delta T = 300 \text{ K}$ を仮に与えた時, 下層 SiO_2 の厚さとバイモルフ梁中心変位 x の関係は, Fig. 5.3 のように求められた. これより, 下層 SiO_2 の厚さ t_2 を約 $0.2 \mu\text{m}$, 梁の長さ l を $20 \mu\text{m}$ に設定することで, 上層 Au の厚さ $t_1 = 0.4 \mu\text{m}$ を超える中心変位 x が得られると見積もることができた.

²やや複雑な式だが, $t_1 = t_2 = t$ として整理することで, 参考文献 [82] に記載されているバイモルフ梁の曲率半径の式と一致する.

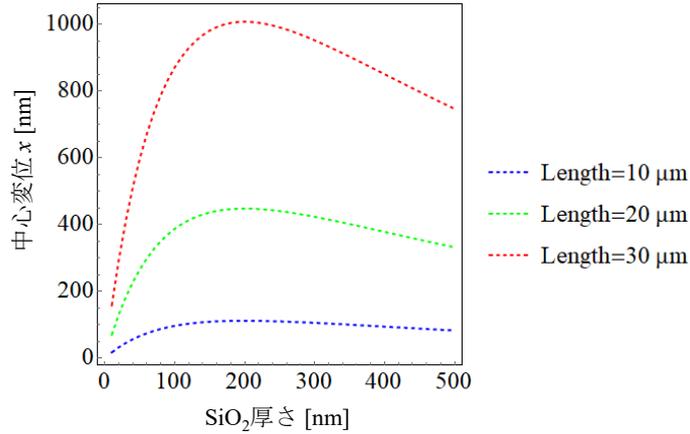


Figure 5.3: 温度変化 $\Delta T=300$ K を与えた時のバイモルフ梁中心変位 x の概算結果.

5.2 光学特性の解析的検証

5.2.1 誘電体層で生じる複屈折の検証

提案する電熱駆動方式 BRM はバイモルフ構造になるため、誘電体のグレーティング層が含まれることになる。誘電体層が含まれることによって、BRM 全体で生じる位相差に影響があるかを検証した。誘電体層単体で生じる位相差を理論的に算出するために、偏光方向ごとの誘電体グレーティングの実効屈折率 n_{2TE} , n_{2TM} を導出した。実効屈折率の導出には、異方性をもった構造で生じる複屈折を体積占有率 f のみで導出する手法を適用した。構造周期が波長に対して十分に小さい場合、実効屈折率 n_{2TE} , n_{2TM} はそれぞれ次式で見積もることができる [58, pp. 362-365].

$$n_{2TE} = fn_2 + (1 - f)n_{\text{Air}} \quad (5.14)$$

$$n_{2TM} = \frac{n_2 \cdot n_{\text{Air}}}{fn_{\text{Air}} + (1 - f)n_2} \quad (5.15)$$

ここで、体積占有率 f は、層中の誘電体の体積の割合で定義される値であり、グレーティングのスリット幅を w 、周期を p とすると、

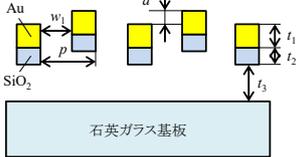
$$f = (p - w)/p$$

で求められる。この導出方法は、非常に簡易ではあるが、格子周期が入射光の波長と同程度の場合や、誘電体と周辺媒質 (本研究では SiO_2 と大気) の屈折率の差が大きいと、

見積精度が低下することがわかっている³.

BRM の寸法を Table 5.1 に示すように設定し、SiO₂ 層の実効屈折率の見積もりを行った。波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ における SiO₂ グレーティングの実効屈折率の計算結果を Fig. 5.4 に示す。SiO₂ の物性値は Malitson の文献値を用いた [84]。これより、体積占有率が 0.5 程度の時に、若干の複屈折が生じることが見積もられた。また、SiO₂ の屈折率が 1.46、空気の屈折率が 1 であることに注意すると、 $w = p$ で $n_{2\text{TE}}, n_{2\text{TM}}$ 共に空気の物性値に収束し、 $w = 0$ では SiO₂ の物性値に収束することがグラフからも確認することができた。

Table 5.1: グレーティングの設計寸法

	寸法パラメータ	設計値
グレーティング周期 p	0.7 μm	
Au 厚さ t_1	0.3 μm	
SiO ₂ 厚さ t_2	0.2 μm	

この結果を元に、誘電体層単体で生じる位相差及び、BRM 全体で生じる位相差を算出した。波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ における SiO₂ グレーティング由来の複屈折位相差の計算結果を Fig. 5.5 に示す。この結果より、SiO₂ 層の構造異方性によって生じる複屈折位相差は、Au ナノグレーティング層で生じる複屈折位相差と比較して微小であることがわかった。したがって、SiO₂ の膜厚が 0.2 μm 程度であれば、誘電体層が BRM の複屈折特性に与える影響は非常に小さく、BRM の光学的な設計方針を修正するほどの影響はないと判断した。

ただし、体積占有率を用いた有効屈折率の導出過程で述べたように、体積占有率のみで構造異方性を議論できるのは、入射光の波長に対して構造周期が十分に小さい場合である。本研究のように、入射光波長と構造周期のサイズが同程度の場合には、誘電体であっても、グレーティング表面で生じるエバネセント波による共鳴現象を無視できない。加えて、ここで検証したのは変形のない状態であり、変位が生じた時に誘電体層の有無がどう影響するかについては、検証できていない。本研究のような複雑な形状を解析する場合は、モデルの制限が少ない数値解析を導入する必要がある。

³これに関する議論や参考文献への展開については、『回折光学素子入門』[83, pp.261-271] が非常に参考になる。

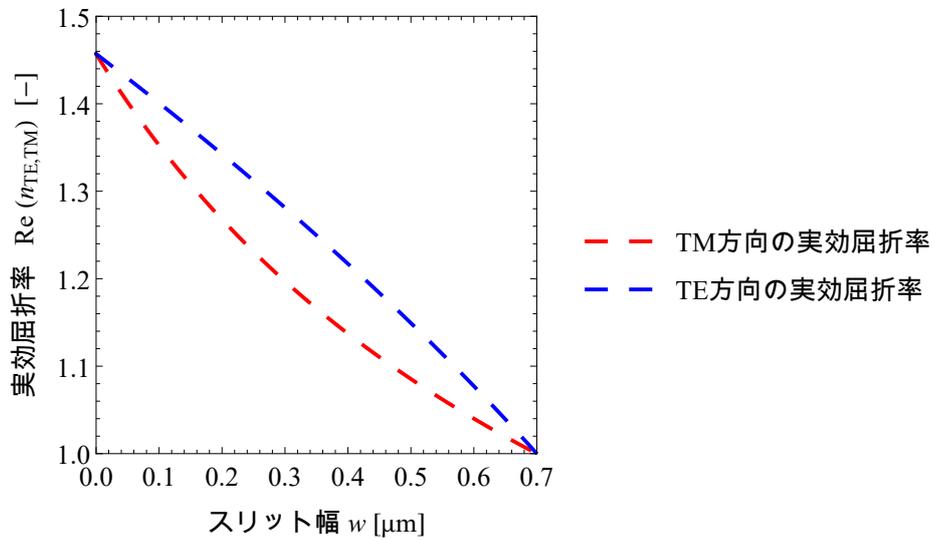


Figure 5.4: 波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ における SiO_2 グレーティングの実効屈折率の理論計算結果. 計算に用いた設計寸法は, Table 5.1 に示した.

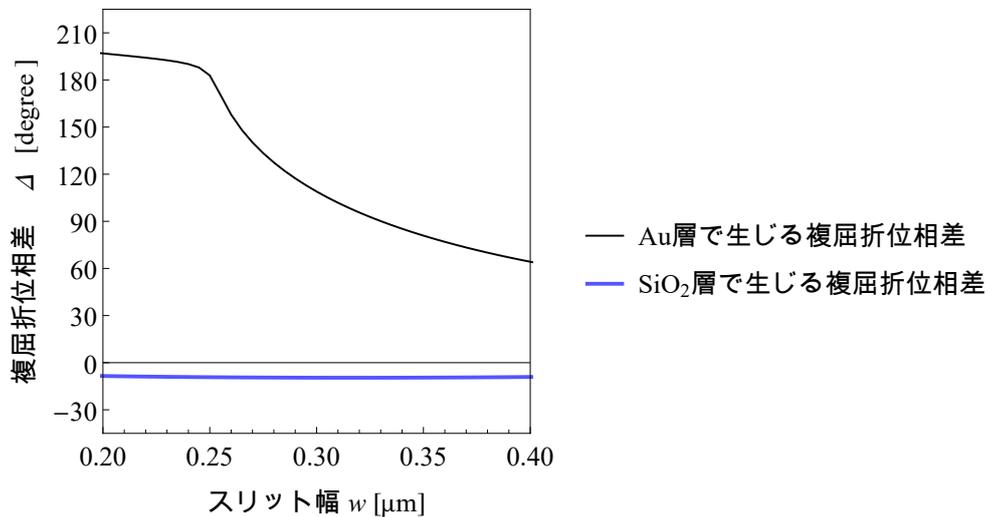


Figure 5.5: 波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ における SiO_2 グレーティング由来の複屈折位相差の理論計算結果. 計算に用いた設計寸法は, Table 5.1 に示した.

5.2.2 数値解析の導入

提案する電熱駆動方式 BRM は、バイモルフアクチュエータを利用するため、特に、面外変形時のグレーティングの断面構造がやや複雑となる。例えば、前述した面外変形時の断面形状を複数のグレーティング層の集積とみなす手法を適用しようとする、膜厚による場合分けが複雑になるだけでなく、MII などの MIM 構造以外の状態も含まれてくる。以上の理由より、光学的解析に理論的なモデルを適用することは困難である。そこで、電熱駆動方式 BRM の複屈折変化の解析には、数値解析による電磁場解析を利用することにした。電磁場解析の手法として、有限差分時間領域法 (Finite-Difference Time-Domain method: FDTD 法) を利用した。FDTD 法は、マクスウェルの方程式を時間及び空間に対して分割し、差分法によって解を導出する、電磁場解析で主要な手法のひとつである。逐次的な時間変化を解くため、電磁場の動きを逐次確認することができるといった利点がある。

計算モデルは、グレーティング中央の湾曲が比較的平坦であると仮定して、紙面鉛直方向に無限遠の 2 次元構造とした。モデル作成ソフト RSoft (Synopsys) を用いて作成した計算モデルと、解析ソフト Fullwave (Synopsys) を使用して計算を行った。

数値解析で使用した 2 次元断面モデルの概略図と、実際の計算中の電磁場の様子を Fig. 5.6 (a),(b) に示す。Au と SiO₂ が集積した周期構造を配置し、下方に設置した光源から、以下の式で表される定常波を入射した。

$$g(t) = \xi_{\text{up}}(t) \sin \frac{2\pi}{\lambda}(t) \quad (5.16)$$

ただし、

$$t < t_{\text{up}} : \xi_{\text{up}} = \sin \frac{\pi}{2}(t/t_{\text{up}})$$

$$t < t_{\text{up}} : \xi_{\text{up}} = 1$$

である。ここで、 ξ_{up} は定常波の立ち上がりをスムーズにするための関数であり、 t_{up} は定常波の立ち上がりにかかる時間 (ランプタイム) を指定する定数である。入射光の偏光方向は、紙面に水平方向 (TM)、または垂直方向 (TE) に指定することができるため、それぞれ計算を行った。構造を透過した波の時間変化 (時間に対する光の進行量) ct に対する電場強度 E は、構造の上方に設置した検出モニタで取得した。時間変化に対する TE, TM 方向の電場強度の変化の計算例を Fig. 5.6 (c) に示した。

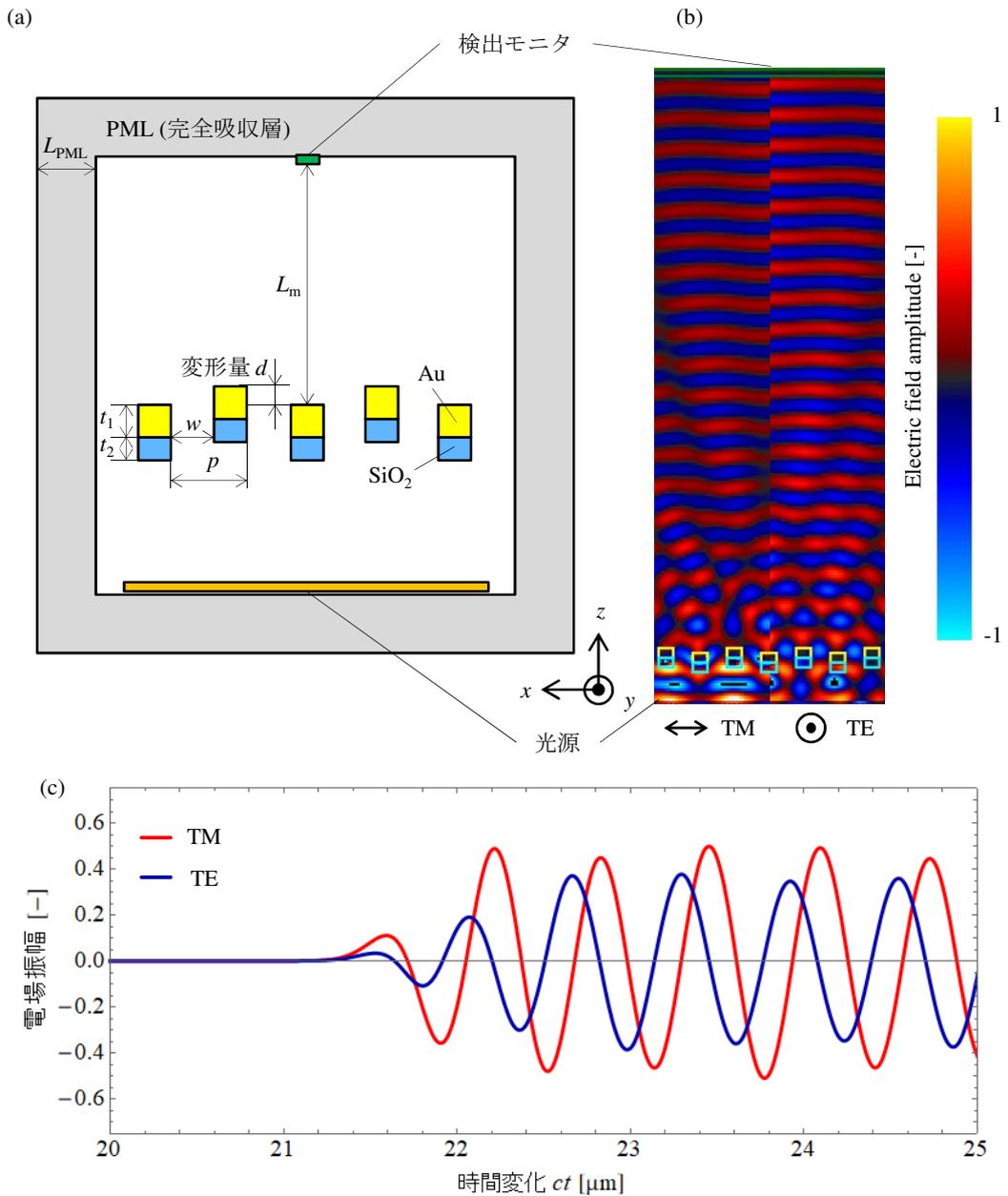


Figure 5.6: (a) 数值解析で使した2次元断面モデルの概略図. (b) 計算中の電磁場の様子の例. (c) 時間変化に対するTE, TM方向の電場強度の変化の計算例. (b), (c) はいずれも、後述の解析結果 (Fig. 5.7) における構造変形量 $d=0.35 \mu\text{m}$ の計算から抜粋.

FDTD法は、計算領域内のすべての領域の電磁場を計算するため、境界条件と計算時間に注意する必要がある. x, z 面の境界条件は、計算モデルの外側に完全吸収層PML (Perfectly matched layer) を配置する「完全吸収境界」を使用した. PMLは、Berenger

によって提案された仮想 (非実在) の媒質のことで、垂直入射する波とインピーダンス整合の取れた物性値に意図的に調整することで、入射光を吸収する。PML を境界の外側に配置する境界条件は、PML 層の厚さ L_{PML} を厚くするほど吸収率が高くなり反射を小さくできるが、その分計算時間が長くなる。Fullwave では L_{PML} を指定することができるが、 $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 程度の厚みがあれば、標準的な計算においては影響がない程度の反射率に低減できる。

TE・TM 方向の偏光を入射した時の電場の時間変化 $E(ct)$ をそれぞれ計算し、相関関数を用いて位相差 δ を算出した。相関関数 R は、2 つのデータ系列 f, g が存在するとき、以下の式で表される。

$$R = \sum_{i=1}^{n-d} f_i g_{i+d} \quad (5.17)$$

ただし、 n はデータ数、 g はデータずらし量を表している。2 つのデータの差が大きいとき R は小さくなり、一致していれば大きくなる。相関関数の f に TE 偏光のデータ系列 E_{TE} を、 g に TM 偏光のデータ系列 E_{TM} をそれぞれ代入し、データずらし量 d の関数として相関関数 R を算出した。位相差は、 R が最大となるずらし量 d に解析の時間ステップ Δt を掛けることで算出した。

FDTD 法による電磁場解析を利用して、変形量に対する位相差の変化を計算し、 SiO_2 層の有無による違いを検証した。グレーティングの寸法は、Table 5.1 に示した値を用いた。スリット幅 w は $0.4\ \mu\text{m}$ とした。Table 5.2 に、解析の諸条件をまとめた。Fig. 5.7 に解析結果を示す。 SiO_2 層を含む場合の位相差のほうが全体的に小さくなっており、前述の理論計算結果と一致する傾向となった。また、 SiO_2 層を含む構造においても、変形量に対して位相差が変化する領域が確認できた。以上の結果より、 SiO_2 層を含む構造になったとしても、BRM の光学的な設計方針を修正するほどの影響はないと判断した。

5.3 製作工程の設計

本研究では、特にバイモルフ構造のリリース工程で種々の困難があり、加工工程の改善を絶えず行った。これらの加工工程を、リリース用の犠牲層の扱いの観点で、大きく 4 つに分類した。次節より、その分類ごとの製作及び形状評価、可変特性の評価について述べる。

Table 5.2: 電磁場解析の諸条件

パラメータ	設定値
セルサイズ $\Delta x (= \Delta z)$	0.02 μm
時間ステップ Δt	$0.0057/c = 1.9 \times 10^{-17}$ ただし c は光速
波源	平面波
入射光波長 λ	0.633 μm
検出モニタと非駆動梁との距離 L_m	20 μm
PML 層の厚さ L_{PML}	0.5 μm

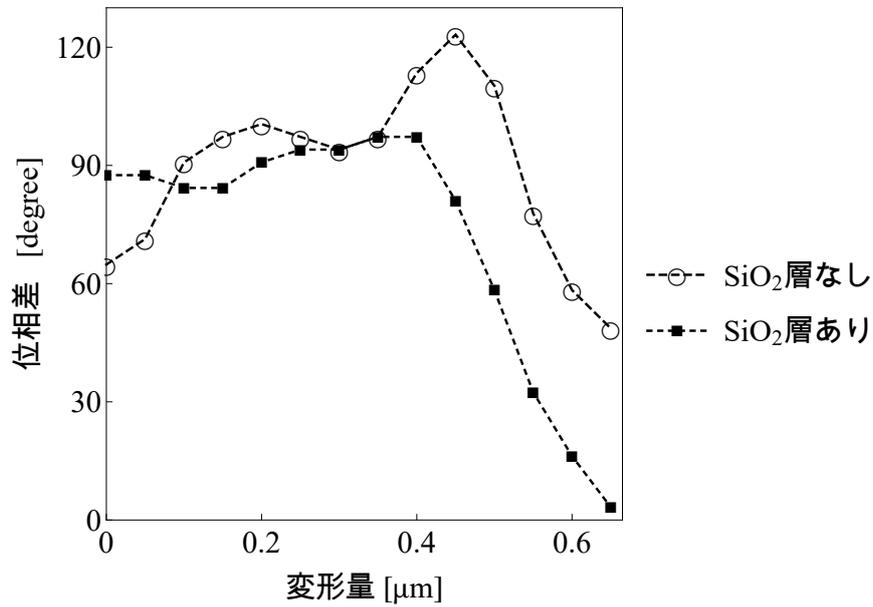


Figure 5.7: 波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ における, 変形量に対する位相差の変化の電磁場解析結果. 計算で使用したグレーティング寸法は Table 5.1 に示した.

5.4 製作と評価 I (時間制御型)

XeF₂ ガスエッチングを時間で制御することで、駆動梁と非駆動梁を区別することを試みた。Fig. 5.8 に考案した製作工程を示す。犠牲層エッチングの時間制御の概要を、Fig. 5.9 を用いて説明する。エッチングガスを利用したドライエッチングは、一般に等方的にエッチングが進行する。XeF₂ ガスエッチングも同様に等方的にエッチングが進行することがわかっているため、スリット部分の Si エッチングが進行すると、梁の下の犠牲層も除去することができる。この時、梁のような細いパターンと比較して、大面積のパターン直下の犠牲層は除去し切るまでに時間がかかる。そのため、梁の下の Si がエッチングされた時点でエッチングを終了することで、選択的な犠牲層除去が可能になると考えた。Fig. 5.10 に設計した 2 次元 CAD の全体図及び BRM 部分の拡大図を示す。孤立パターンである非駆動梁に固定アンカーが残るように、梁パターンの端部を梁の幅の 2 倍の幅になるように設計した。本試作は、犠牲層エッチングを時間で制御して行うことから、「時間制御型」と呼称した。

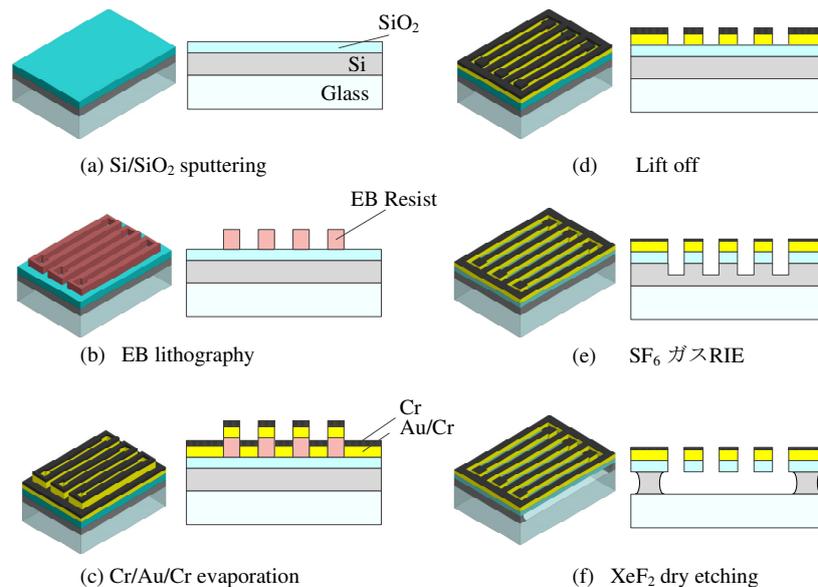


Figure 5.8: 時間制御型の製作工程. (a) 洗浄したガラス基板に、Si と SiO₂ をスパッタリング成膜した. (b) EB 描画でグレーティング及び電極パターンを描画した. (c),(d) 接着層 Cr, Au, エッチングマスク用の Cr を連続で蒸着し、リフトオフを行った. (e) SF₆ ガス RIE で SiO₂ をエッチングした. (f) 最後に、グレーティング下部の Si が消失するまで XeF₂ ガスエッチングを行った.

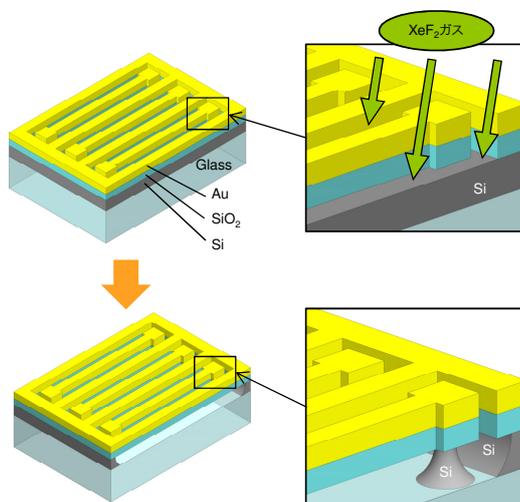


Figure 5.9: 犠牲層エッチングの時間制御の概要.

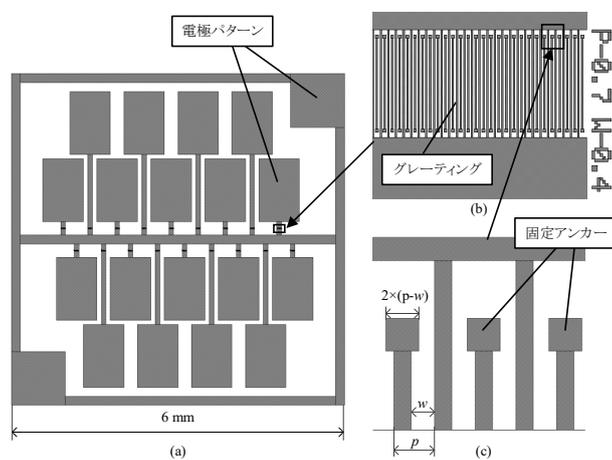
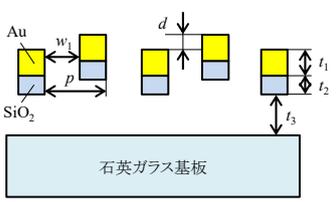


Figure 5.10: 時間制御型の CAD 設計図. 黒い部分が、完成時に Au のパターンが形成される部分である. (b)BRM のグレーティング部の拡大図. (c) 非駆動梁のアンカー部分の拡大図.

5.4.1 数値解析による位相差変化量の見積もり

まず，設計寸法で得られる位相差変化量を見積もるために，FDTD 法による数値解析を行った．グレーティングの設計寸法は，製作工程の実現性を考慮し，Table 5.3 に示す値に設定した．Fig. 5.6 に示したモデルに設計寸法を適用し，計算を行った結果を Fig. 5.11 に示す．数値計算により，波長 $0.65 \mu\text{m}$ 付近において，最大 80° 程度の位相差変化量が得られる可能性があることがわかった．また，変位量の増加によって位相差が上昇する範囲と，減少する範囲があることがわかった．

Table 5.3: グレーティングの設計寸法

寸法パラメータ		設計値
	グレーティング周期 p	$0.7 \mu\text{m}$
	スリット幅 w_1	$0.4 \mu\text{m}$
	Au 厚さ t_1	$0.2 \mu\text{m}$
	SiO ₂ 厚さ t_2	$0.2 \mu\text{m}$
	グレーティング長さ l	$20 \mu\text{m}$

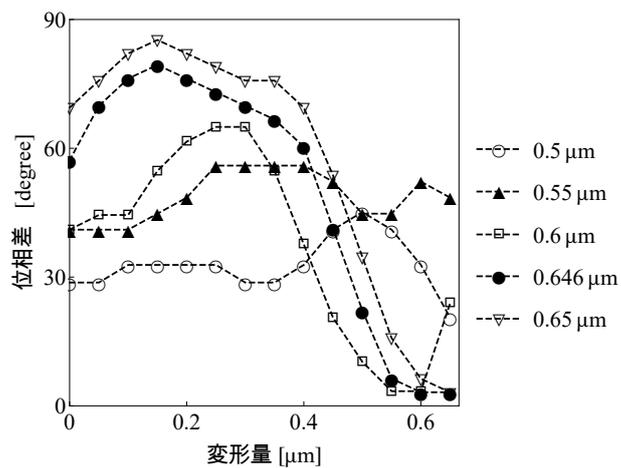


Figure 5.11: 時間制御型の設計寸法における，変位量に対する位相差変化の数値計算結果．

5.4.2 製作

考案した製作工程に従って、BRMの試作を行った。

(a) SiO₂/Siのスパッタリング成膜

スパッタリング成膜装置を使用して、SiとSiO₂を成膜した。設計膜厚及び成膜条件をTable 5.4に示す。成膜後は、基板固定に使用したポリイミドテープの粘着成分を除去するために、有機洗浄を行った。

Table 5.4: スパッタリング成膜条件

Si(条件は3.3に記載したものを利用)			
設計膜厚	0.5 μm	成膜時間	12 min 24 sec
SiO ₂			
設計膜厚	0.2 μm	成膜時間	4 min 30 sec
使用した成膜レート	45 nm/min	チャンバ圧力	2.0 × 10 ⁻¹ Pa
DC/RF	1000 W/ 0 W	ガス流量	Ar:30 sccm O ₂ :6 sccm

(b) EB描画によるパターンニング

大面積の電極パターンと微細グレーティングパターンを同時に描画するために、高速大面積描画が可能なF5112+VD01を利用した。EBレジストは、厚膜かつ高感度であることが特徴で、サブ波長スケール構造のリフトオフ工程に適していることから、OEBRCAP112PMを使用した。作業工程はTable 3.1, 3.2に記載した通りに実施した。レジスト塗布時のスピコートは、レジスト膜厚が1.0 μmとなるよう5000 rpmで60 sec実施した。レジストベーク後、基板のチャージアップを防ぐため、エスベイサを塗布した。露光量は、標準条件を参考に6.0 μC/cm²とした。現像後、残渣を除去するためにO₂プラズマアッシングを30 sec行った。

(c), (d) Cr/Au/Crの真空蒸着及びリフトオフ

真空蒸着器(SVC-700EB)を使用してAu/Crの真空蒸着を行った。Table 5.5に各種条件及び設計膜厚を示す。

蒸着後、試料をアセトンに数日浸漬し、最後に超音波洗浄を行うことで、蒸着膜のリフトオフを行った。

Table 5.5: 真空蒸着の成膜条件及び設計膜厚

-	設計膜厚 [μm]	成膜レート [nm/s]	加熱電流 [A]	エミッション電流 [A]
Cr	0.01	8	7	12×10^{-3}
Au	0.2	10 ~ 17	21	-
Cr	0.03	8 ~ 10	7	15×10^{-3}

(e) SF_6 ガス RIE による SiO_2 層のエッチング

Cr 層をエッチングマスクとして、 SiO_2 層のエッチングを行った。エッチングガスを SF_6 ガス、RF 電力を 40 W とした条件で 60 sec 実施した。

(f) XeF_2 ガスエッチングによる犠牲層 Si エッチング

XeF_2 ガスエッチング装置 VPE-4E を使用して、犠牲層 Si のエッチングを行った。エッチング条件は Table 3.4 で示した標準条件とし、エッチングサイクル回数は 1 回とした。

形状評価

試作した時間制御型 BRM の SEM 観察像を Fig. 5.12 に示す。グレーティング部分を拡大して観察したところ、非駆動梁の固定アンカーが剥離してしまっている部分が観察された。これより、 XeF_2 ガスエッチング時間が過剰であることが明らかとなった。駆動梁については、破断もなく電極パターンに接続されていることが確認できた。また、リフトオフが完遂できておらず、不要な金属残渣が残ってしまっている部分も散見された。

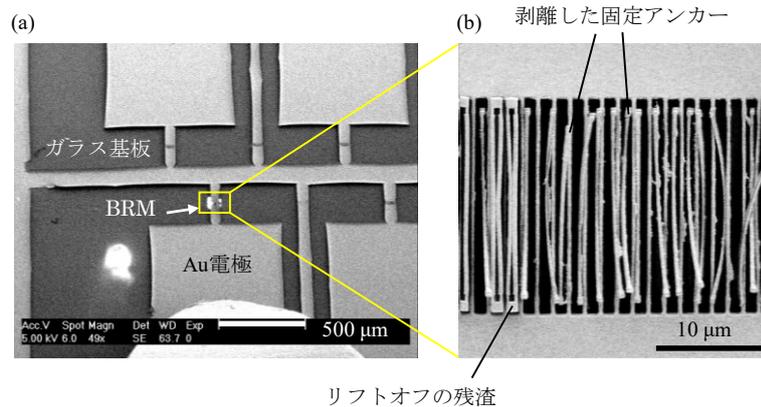


Figure 5.12: 試作した時間制御型 BRM の SEM 観察像。電極パターンを含む全体像及びグレーティング部分の拡大図。

5.4.3 光学特性の評価

駆動梁については設計通り電極に接続された状態であったので、通電加熱による位相変化の測定を行った。光学測定は3.2.7項に示した回転検光子法を用いた。20倍対物レンズ及びコア径200 μm の光ファイバを用い、スポット径10 μm で観察を行った。電圧は、ソースメータ2410 (KEITHLEY)を定電圧源として使用して印加した。試料の固定及び配線方法をFig. 5.13に示す。試料は、中央部が貫通しているアクリル製の試料台に乗せ、アルミニウム製の固定爪で固定した。その際、爪の先端が電極パターン上来るようにすることで、試料の固定と電極の配線が同時に達成できるようにした。



Figure 5.13: 試料の固定及び配線方法。0.5 mm厚のアルミニウム板を切り出して製作した固定爪を使用して、電極に配線し、同時に試料台への固定を行った。

測定は、各電圧印加時の条件でそれぞれ2サイクルの測定を行い、平均値を取得した。本測定では、検光子角度 15° 毎に $0^\circ \sim 180^\circ$ までの透過光強度を取得した。試作したBRMの光学特性の測定結果をFig. 5.14に示す。印加電圧を0 Vから10 Vまで変化させたところ、入射光波長0.656 μm において、 -3.3° の位相差変化($37.4^\circ \sim 34.1^\circ$)が得られた。また、位相差は、波長0.5 $\mu\text{m} \sim 0.8 \mu\text{m}$ の間で減少傾向を示した。振幅透過率については、TE, TM偏光共に大きな変化は見られなかった。

測定された位相差特性は、初期位相差及び変化量共に、数値計算結果よりも小さい値であった。初期位相差が小さくなった原因は、蒸着による垂直性の悪さが原因と考えられる。Auナノグレーティングは、スリット幅が広いほど位相差が小さくなる傾向があるため、垂直性の悪い断面構造により、初期位相差が設計値より減少したと推測される。また、変化量に関しては、剥離した非駆動梁の影響で、設計通りの面外駆動が生じなかったことが原因と考えられる。いずれの光学特性についても、改善するには製作工程を見直す必要がある。

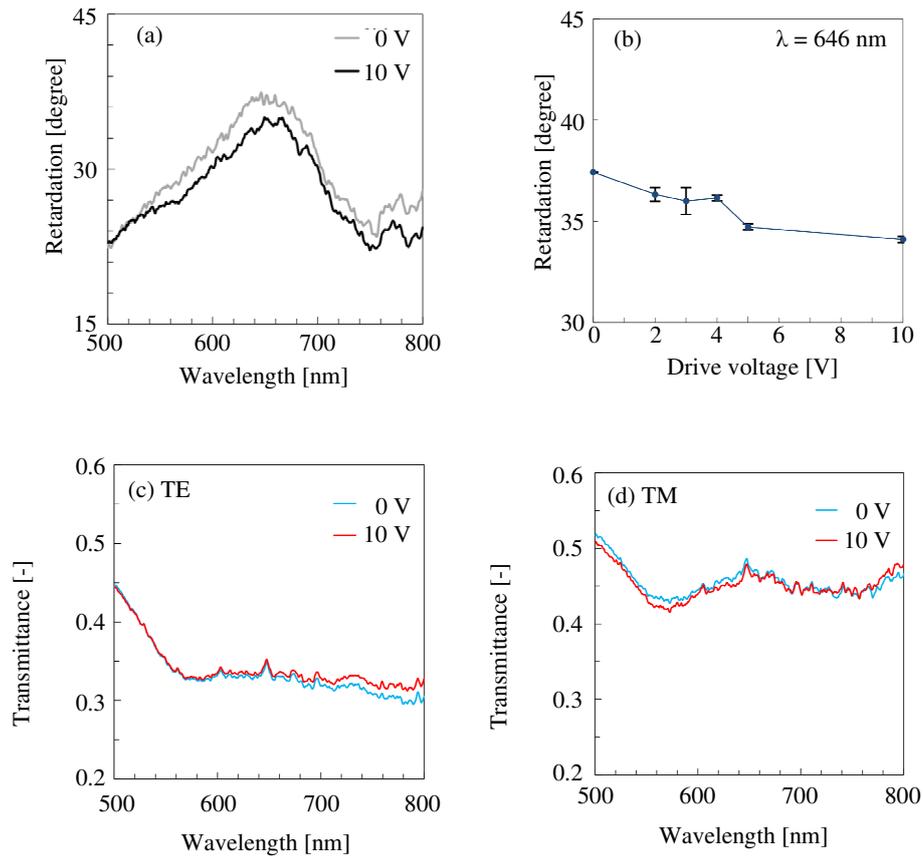


Figure 5.14: 時間制御型の光学特性の測定結果. (a) 印加電圧 0 V 及び 10 V における位相差スペクトル. (b) 入射光波長 $0.646 \mu\text{m}$ における, 印加電圧に対する位相差の変化. エラーバーは, 2 サイクル分の測定データの標準偏差. (c),(d) 印加電圧 0 V 及び 10 V における TE, TM 偏光の振幅透過率スペクトル.

5.4.4 製作工程 II に対する考察

前述したように、本試作において、入射光波長 $0.656\ \mu\text{m}$ において、 -3.3° の位相差変化量 ($37.4^\circ \sim 34.1^\circ$) が得られた。この結果より、提案する電熱駆動方式 BRM で位相差が変化するという仮説を実証することに成功した。しかし、実際に構造が駆動している様子を観察することはできなかった。

以降は、考案した製作工程について検証する。試作した素子のグレーティング構造は、 XeF_2 エッチングによるリリース後に剥離が生じてしまった。Fig. 5.12 より、 XeF_2 ガスエッチングを過剰に行ってしまったことが原因であることが推測される。これを裏付ける根拠として、同じ基板上に比較用として描画した、固定梁の幅が $1.0\ \mu\text{m}$ (周期 $2.0\ \mu\text{m}$, スリット幅 $1.0\ \mu\text{m}$ で設計) のグレーティングの SEM 像を Fig. 5.15 に示す。試作した BRM よりも大きな寸法で製作したグレーティングにおいても固定アンカーの剥離が確認されたため、犠牲層エッチングが過剰に進んでしまったことがわかる。しかしながら、今回のガスエッチングは、装置標準条件の最短のエッチング時間 (エッチングサイクル 1 回) で実施している。この結果より、 XeF_2 ガスエッチングのエッチング量を時間で制御することは困難であるという結論に至った。

また、本工程では金属膜のパターンニングをリフトオフ工程で実施したが、膜の除去が完遂できず、グレーティング部分に金属の残渣が残ってしまった。リフトオフで膜を除去しやすくするためには、経験的に金属膜厚の 2~3 倍の厚みのレジストを利用する必要がある。そのため、本工程では厚膜で描画できることが特徴のポジ型 EB レジストを使用した。Fig. 5.16 に示すように、背の高いレジストを用いると、金属膜の断面形状の垂直性が悪くなることが分かった。これらの蒸着に関する問題は、金属膜厚が厚いことによって生じる問題である。今回、Au の膜厚を $0.2\ \mu\text{m}$ に設定したが、より大きな複屈折特性を得るために、Au 膜厚はさらに厚くする必要がある。したがって、本研究で提案する BRM の製作に蒸着・リフトオフ工程を利用するのは適当ではないと判断した。

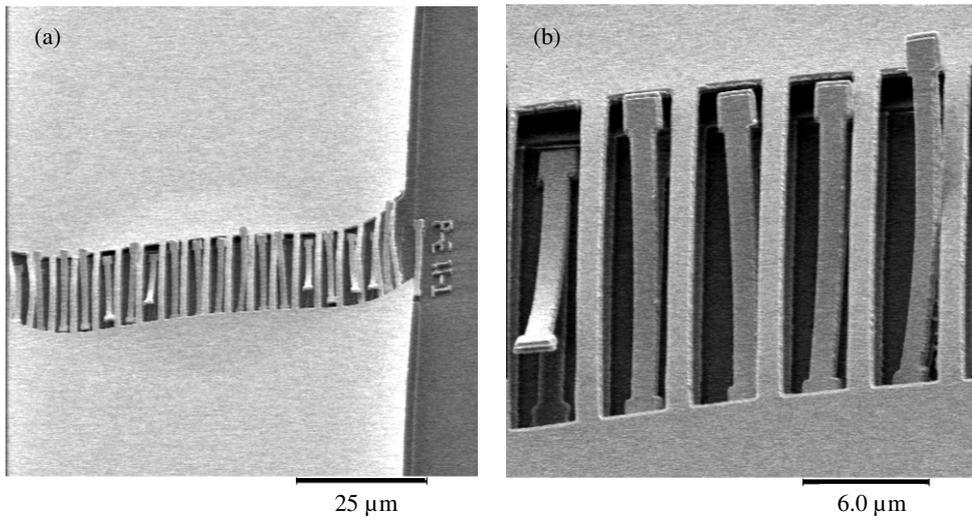


Figure 5.15: 固定梁の幅が $1.0 \mu\text{m}$ のグレーティング構造. 設計寸法は, 周期 $2.0 \mu\text{m}$, スリット幅 $1.0 \mu\text{m}$.

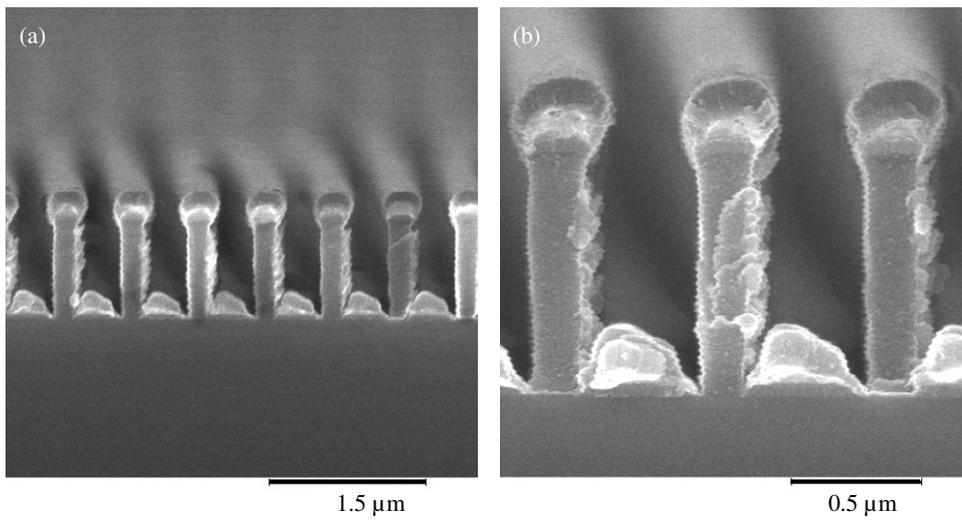


Figure 5.16: 金属膜を真空蒸着した後の試料断面の SEM 観察像.

5.5 製作と評価 II (成膜パターニング型)

時間制御型で問題となった、XeF₂ ガスによる Si 犠牲層エッチングの時間制御が不要となる工程を考案した。成膜パターニング型の工程を Fig. 5.17 に示す。Si 層をガスエッチングで除去する工程は、自立構造のリリースにおいて問題となる液体の表面張力が発生しないという利点があるため、継続して採用した。そこで、全ての Si 層をエッチングしても自立構造が破壊しないよう、予め犠牲層をパターニングしておくことによって、ガスエッチングの時間制御が不要となるように工程を変更した。本試作は、犠牲層を成膜する段階で予めパターニングしておくことから「成膜パターニング型」と呼称する。

Si 犠牲層は、のちに Au 及び SiO₂ を成膜することを考慮し、できるだけなだらかな傾斜を持った丘陵構造にしておくのが望ましい。そこで、Si を SF₆ ガスで RIE する際に生じるサイドエッチングを利用して、Si 犠牲層の断面が台形形状になるような工程を (b)~(c) に追加した。また、Au グレーティング部分を RIE で加工するように変更することで、リフトオフの制約となっていた Au 膜厚をより厚くすることが可能になると考えた。ただし、RIE 用のマスクとなる Cr 層も同様に厚くする必要が生じた。

Fig. 5.18 に、設計した 2 次元 CAD 図面を示す。(a) が全体図、(b) が電極を含む BRM の全体図、(c) が BRM のグレーティング及び犠牲層パターン部分の拡大図である。青い輪郭で示した 20 mm 角基板に合わせるようにして、橙色で示したパターンをフォトリソグラフィで露光する。(c) に示したグレーティングパターンを横断する線が、犠牲層をパターニングする部分である。黒色で示したパターンを EB で描画する際、フォトリソグラフィのパターンに対してアライメントを行う必要がある。アライメント要求精度に余裕を持たせるために、グレーティングパターンの端部と、犠牲層パターンの間にマージンを取るようにした。

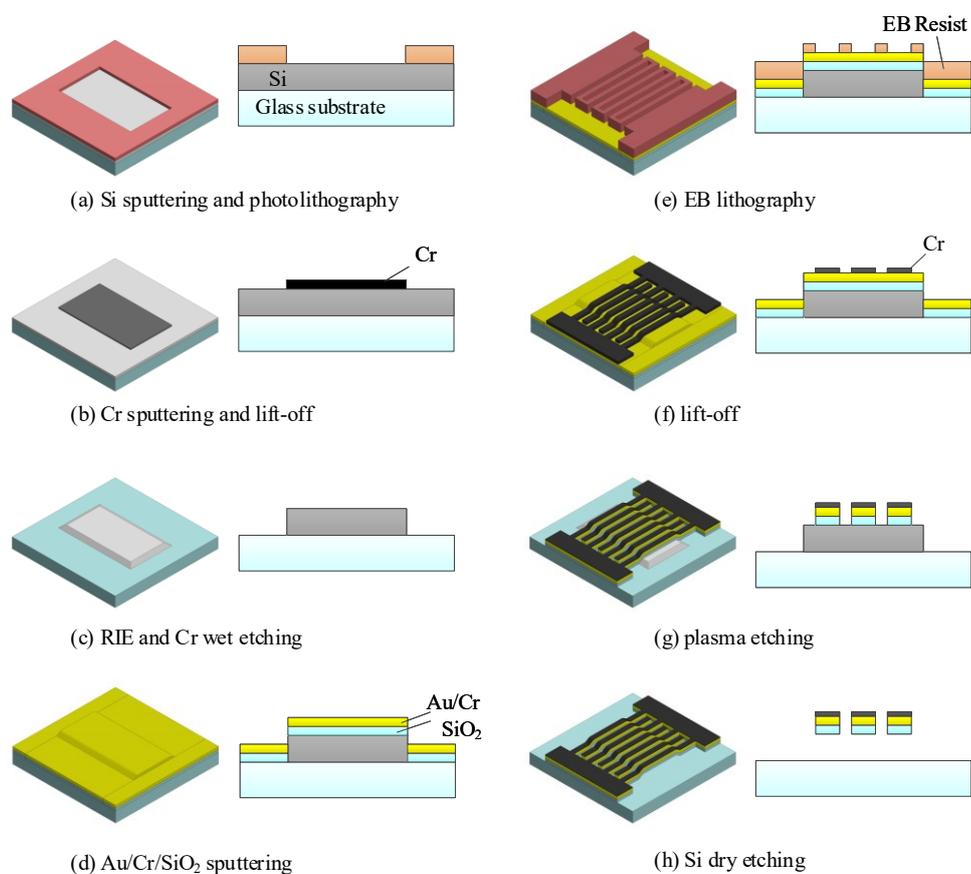


Figure 5.17: 成膜パターンニング型の製作工程. (a) 洗浄したガラス基板に Si をスパッタリング成膜し、フォトリソグラフィで Si 犠牲層のパターンニングを行った. (b) Cr をスパッタリング成膜し、その後リフトオフすることで、エッチングマスクを製作した. (c) Si を RIE したのち、マスクとして使用した Cr をウェットエッチングで除去した. (d) Au と SiO_2 をスパッタリング成膜した. (e) EB 描画を行い、犠牲層パターンに合わせてグレーティング及び電極パターンを描画した. (f) Cr を蒸着し、その後リフトオフすることで、エッチングマスクを製作した. (g) RIE で Au/ SiO_2 をエッチングし、グレーティングを製作した. (h) 最後に、 XeF_2 ガスによる Si のエッチングを行い、すべての Si を除去した.

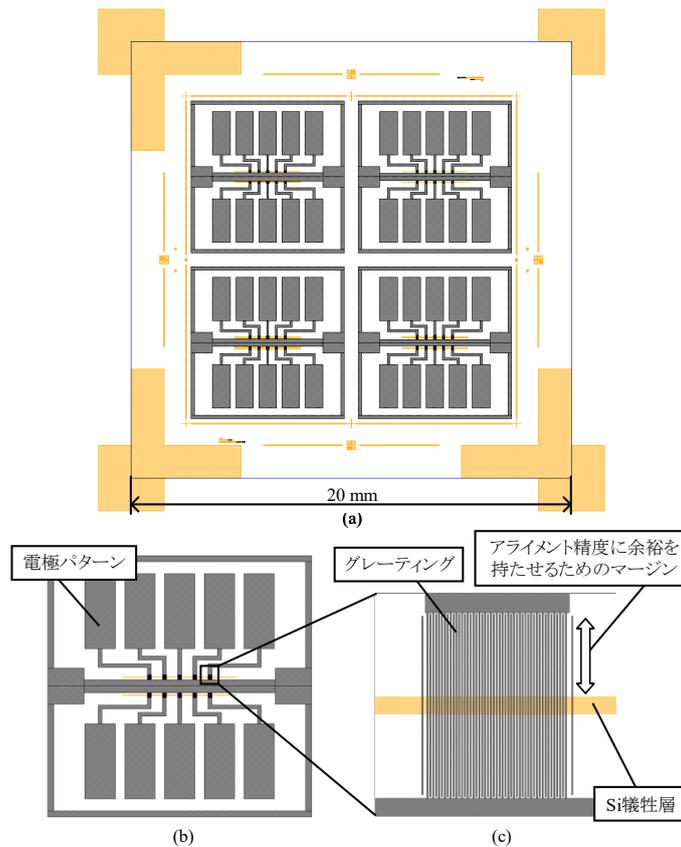


Figure 5.18: 成膜パターンニング型の2次元CAD図面。黒いパターンがEBで描画する金属パターン、橙色のパターンが、フォトリソグラフィで露光するSiパターンである。(a)が全体図、(b)が電極を含むBRMの全体図、(c)がBRMのグレーティング及び犠牲層パターン部分の拡大図を示している。

5.5.1 数値解析による位相差変化量の見積もり

まず、設計寸法で得られる位相差変化量を見積もるために、FDTD法による数値解析を行った。グレーティングの設計寸法は、製作工程の実現性を考慮し、Table 5.6に示す値に設定した。Au厚さは、蒸着及びリフトオフ工程の制約がなくなったため、時間制御型よりも厚めに設定した。Fig. 5.6に示したモデルに設計寸法を適用し、計算を行った結果をFig. 5.19に示す。時間制御型の計算結果と同様に、変形量の増加によって位相差が増加する領域と、減少する領域が存在することがわかった。この領域には波長依存性があることが、計算結果から示唆される。位相差変化量については、波長 $0.65\ \mu\text{m}$ において、最大約 70° の位相差変化が得られることが示された。

Table 5.6: グレーティングの設計寸法

寸法パラメータ		設計値
グレーティング周期 p		0.7 μm
スリット幅 w_1		0.4 μm
Au 厚さ t_1		0.3 μm
SiO ₂ 厚さ t_2		0.2 μm
グレーティング長さ l		50 μm

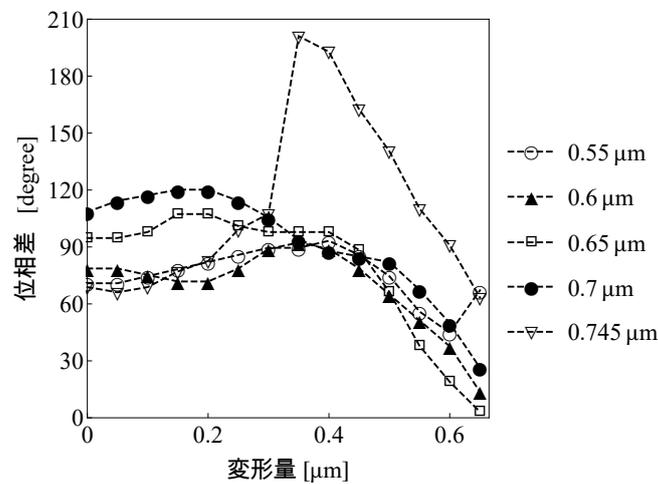
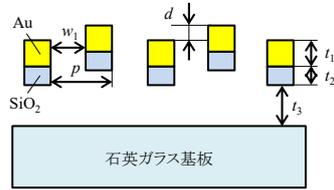


Figure 5.19: 成膜パターンニング型の設計寸法における，変位量に対する位相差変化の数値計算結果.

5.5.2 製作

考案した製作工程に従って，BRM の試作を行った.

(a) Si スパッタリング成膜及びフォトリソグラフィ

20 mm 角の石英ガラス基板を，Table 3.6, 3.7 に示した有機洗浄及びピラニア洗浄工程で洗浄した. その後，スパッタリング装置 (NFTS-3S-R0601, FTS) を使用して Si を成膜した. 設計膜厚は 500 nm とし，13 min 46 sec 成膜した. 成膜時の条件は，Table 3.3 に記載した Si 成膜条件を使用した.

続いて、フォトリソグラフィにより Si 犠牲層のパターニングを行った。フォトマスクは、ナノテクプラットフォーム東大拠点 (VDEC) の設備を利用して製作した。レジストはポジ型の OFPR-800LB を使用し、Table 3.2 に記載したとおりに作業を実施した。

(b) Cr スパッタリング成膜及びリフトオフによるマスク製作

スパッタリング成膜装置でエッチングマスク用の Cr を成膜した。のちのアライメント作業で使用するマークを含むため、推奨条件の $0.1 \mu\text{m}$ に設定するのが望ましいと考えたが、予備実験においてリフトオフ不良が生じた。そのため、膜厚は $0.05 \mu\text{m}$ とし、Table 3.3 に記載した条件で 4 min 30 sec 成膜した。成膜後、アセトンに一晩浸漬し、超音波洗浄によりリフトオフを行った。

(c) Si の RIE 及び Cr エッチング

工程 (b) でパターニングした Cr 層をマスクとして、Si 層を SF_6 ガス RIE でエッチングした。RF 電力を 30 W とした条件で 50 sec 実施した。残った Cr マスクを、ウェットエッチングで除去した。エッチャントは N14B (日本化学産業) を使用し、約 5 min の浸漬ですべての Cr が消失した。

(d) Au/Cr/SiO₂ スパッタリング成膜

スパッタリング装置を使用して、SiO₂、接着層 Cr、Au の成膜を行った。それぞれの膜の設計膜厚及び成膜時間を Table 5.7 に示す。成膜時の条件は、Table 3.3 に記載した条件を使用した。

-	設計膜厚	成膜時間
Au	$0.3 \mu\text{m}$	21 min
Cr (接着層)	$0.01 \mu\text{m}$	1 min
SiO ₂	$0.2 \mu\text{m}$	13 min

(e) EB 描画によるグレーティング及び電極のパターニング

EB 描画を用いて、グレーティング及び電極パターンを描画した。レジスト及び描画条件を時間制御型と同条件にしたところ、予備実験においてグレーティング部分のレジストが一部倒壊した。断面の観察を行ったところ、露光過多となっていることがわかつ

た。この要因は、厚い Au 膜上への描画により電子の反射が生じたためと推測されたので、露光量を $6.0 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ から $5.5 \sim 5.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ に減らして実施した。それ以外の条件は、時間制御型から変更せずに行った。

(f) Cr 蒸着及びリフトオフによるエッチングマスクの製作

Table 5.8 に示す条件で、エッチングマスク用の Cr の真空蒸着を行った。成膜後、工程 (b) と同様のリフトオフ作業を行った。

Table 5.8: 真空蒸着の成膜条件及び設計膜厚

-	設計膜厚 [μm]	成膜レート [nm/sec]	加熱電流 [A]
Cr	0.3	7 ~ 10	20

(g) RIE によるグレーティング構造のエッチング

Cr 層をマスクとして使用し、RIE を行った。エッチングガスは、Cr に対して SiO_2 の選択比が大きくなる SF_6 ガスを選択した。RF 電力を 30 W とした条件で、10 min 実施した。

(h) XeF_2 ガスによる Si 犠牲層エッチング

最後に、 XeF_2 ガスエッチング装置を使用して、Si 犠牲層のエッチングを行った。エッチング条件は、第 3 章で示した標準条件とした。エッチングサイクル回数は、Si が自立構造の下に残存しないように、ややオーバーエッチング寄りの 15 回とした。

形状評価

試作した成膜パターンニング型 BRM の SEM 観察像を Fig. 5.20 に示す。Fig. 5.20(a) に示すように、リリース後に一部の梁の破断が確認された。破断の様子から、何らかの要因によって、パターン描画前後の工程でパターンの切れ目が生じ、それが最終的な構造に反映されたことが要因と考えられる。Fig. 5.20(b) のように、破断の生じなかった部分では、比較的綺麗なグレーティング構造が製作できた。Si 犠牲層の段差部分は、破断などが生じずに配線されているが、隣り合う梁同士で接触している可能性があることがわかった (Fig. 5.20(c))。Fig. 5.20(d) に示すように、グレーティング端部では導通する梁と孤立した梁がパターンニングできたが、犠牲層段差部分で非駆動梁の短絡が生じている恐れがあることがわかった。

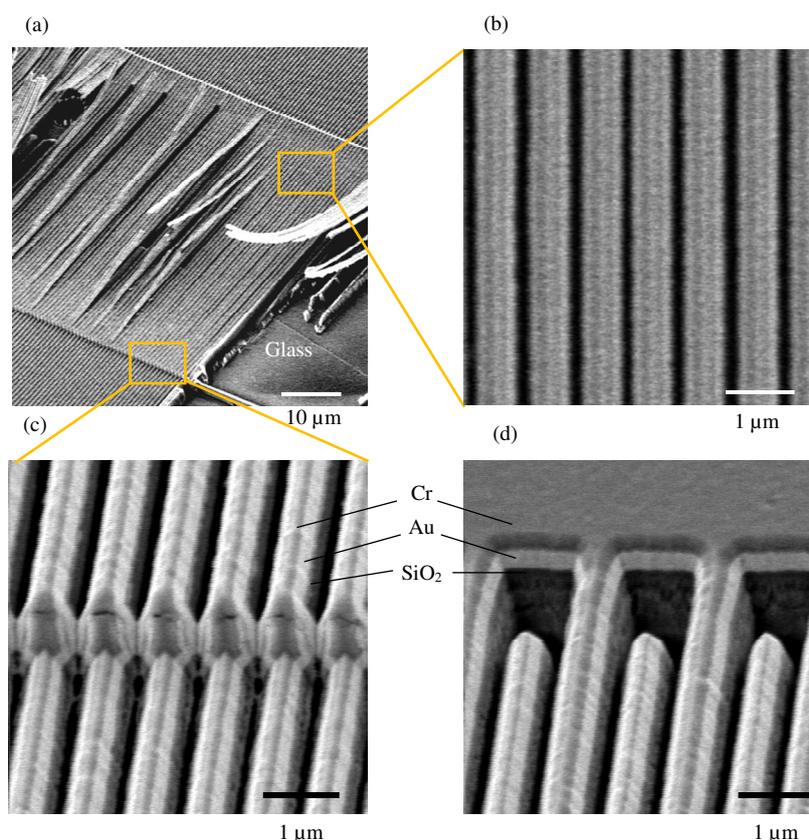


Figure 5.20: 試作した成膜パターンニング型 BRM の SEM 観察像. (a) グレーティング全体. (b) 直上から観察したグレーティング拡大図. (c) Si 犠牲層の段差部分の拡大図. (d) グレーティング端部の電源に接続する部分.

5.5.3 光学特性の評価

試作した BRM を用いて、通電加熱による駆動試験を行った。測定環境は、時間制御型と同じ条件に設定した。電圧印加の条件ごとにそれぞれ 2 回測定し、平均値を測定値とした。本測定では、検光子角度 15° 毎に $0^\circ \sim 180^\circ$ までの透過光強度を取得した。試作した BRM の光学特性の測定結果を Fig. 5.21 に示す。印加電圧を 0 V から 1.48 V まで変化させたところ、入射光波長 $0.745 \mu\text{m}$ において、 5.1° の位相差変化 ($62.0^\circ \sim 67.1^\circ$) が得られた。これは、初期位相差の 8.3% にあたる変化量である。また、位相差は、波長 $0.5 \mu\text{m} \sim 0.8 \mu\text{m}$ の間で変化した。Fig. 5.21(a) に示した位相差スペクトルは、波長の違いに対して振動するような傾向を示しているが、全ての測定において同様のスペクトル形状を示すことから、光学系で生じる干渉の影響と推測した。

本試作では、時間制御型と比較して初期位相差が大きくなった。この結果は、製作工

程の変更によって Au の設計膜厚を $0.3 \mu\text{m}$ に増加させることができたためであると考えられる。また、本試作では、印加電圧の増加に伴い、位相差が増加する傾向となった。推測の域を出ないが、この要因として考えられることとして、段差部分の短絡により一部の非駆動梁にも電圧が印加され、一部の梁で静電気力の反発が生じた可能性が挙げられる。静電駆動方式の考察でも触れたように、スリット幅は Au グレーティングの複屈折位相差に大きく影響する。したがって、もし梁同士の反発によってスリット幅が減少するような現象が起きていれば、印加電圧の増加に伴って位相差が増加する可能性がある。本試作は、再現実験中に焼損した。

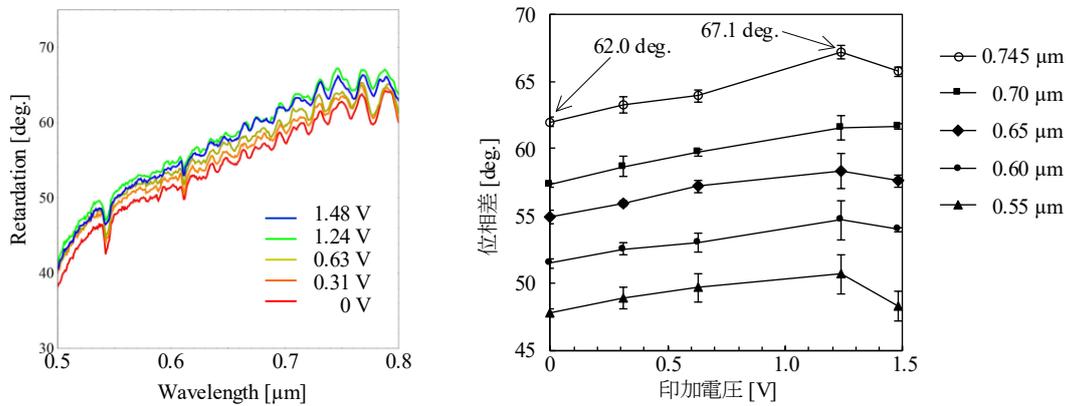


Figure 5.21: 成膜パターンニング型の位相差変化特性の測定結果. (a) 印加電圧 0 V ~ 1.48 V における位相差スペクトル. (b) 各波長ごとの印加電圧に対する位相差の変化. エラーバーは、2 サイクル分の測定データの標準偏差.

5.5.4 製作工程 II に対する考察

成膜パターンニング型による試作では、時間制御型と比較して初期位相差が大きくなった。この主要因は、製作工程の変更によって Au の設計膜厚を $0.3 \mu\text{m}$ に増加させることができたことであると考えられる。したがって、蒸着とリフトオフによって行っていた金属膜のパターンニングを RIE によるエッチングに変更したことは、Au ナノグレーティングの初期位相差を大きくするために有効であることが明らかとなった。

また、Si 犠牲層をパターンニングすることにより、XeF₂ ガスエッチングの時間制御が不要になったことで、自立構造を剥離なくリリースすることに成功した。しかしながら、犠牲層の段差部分において、グレーティングパターンのエッチングが完遂できないことがわかった。これは、傾斜部分に成膜されたバイモルフ層を鉛直な断面で見た時、その厚みが成膜した厚さよりも厚くなるためと考えられる (Fig. 5.22)。したがって、傾斜部

分のバイモルフ層をエッチングし切るには、RIEの時間を延ばす必要があるが、その間に平坦部のパターンのCrマスクが消失し、その下のAu層がエッチングされてしまう恐れがある。以上のことから、犠牲層パターンニングによって生じる新たな課題として、段差部分での短絡を解決するのが困難であることがわかった。

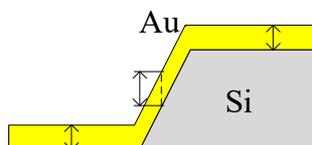


Figure 5.22: 犠牲層 Si の傾斜部分と閉店部での Au 層の鉛直方向の厚みの概略図。

以上より、本試作によって犠牲層パターンニングの効果を実証することができたが、電熱駆動方式の面外駆動を実証するには、さらなる改善が必要であることがわかった。

5.6 製作と評価 III (埋込パターンニング型)

成膜パターンニング型では、パターンニングされた犠牲層の段差部分で非駆動梁が短絡してしまう問題が生じた。そのため、できるだけ段差のない Si 犠牲層のパターンニングができないか検証した。予めガラス基板に溝を加工しておき、そこに Si を埋め込むことで、段差のない犠牲層を形成できると考えた。本試作は、犠牲層を基板に埋め込んだ状態でパターンニングするため、「埋込パターンニング型」と呼称する。

考案した製作工程を、Fig. 5.23 に示す。まず、工程 (a)~(d) でガラス基板への犠牲層 Si の埋め込みを行った。ガラス基板への溝加工は、Cr をマスクとした RIE で行った。Cr を選択した理由は、SiO₂ との高選択比 RIE が可能で、かつウェットエッチングで除去できるためである。続いて、(e)~(j) の工程で Si 犠牲層の上にグレーティング構造を製作した。後半の工程については、成膜パターンニング型から大きな変更は行わなかった。2次元 CAD 図面も、成膜パターンニング型と同じデータを使用した。ただし、犠牲層のパターンニングは、レジストの垂直性が必要となるため、EB 描画に変更した。

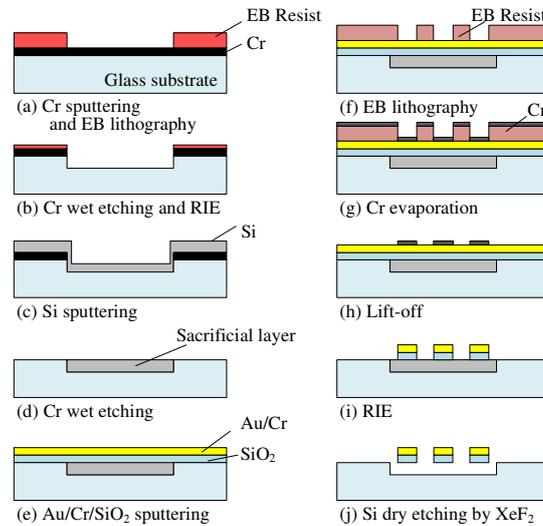


Figure 5.23: 埋込パターンニング型の製作工程。(a) 石英ガラス基板に Cr をスパッタリング成膜し、電子ビーム描画で Si 犠牲層用のパターンニングを行った。(b) レジストをマスクにウェットエッチングすることで、Cr 層のパターンニングを行った。続けて、SF₆ ガス RIE を行い、ガラス基板に溝を加工した。(c) レジストを除去後、Si をスパッタリング成膜した。(d) Cr をウェットエッチングすることで、ガラス基板への Si 犠牲層の埋込工程を完遂した。(e)~(j) は、成膜パターンニング型の (d)~(h) と同じ工程である。

5.6.1 数値解析による位相差変化量の見積もり

まず，設計寸法で得られる位相差変化量を見積もるために，FDTD 法による数値解析を行った．グレーティングの設計寸法は，製作工程の実現性を考慮し，Table 5.9 に示す値に設定した．この値を，Fig. 5.6 に示した計算モデルに適用し，計算を行った結果を Fig. 5.24 に示す．時間制御型の計算結果と同様に，変形量の増加によって位相差が増加する領域と，減少する領域が存在することがわかった．グラフに，バイモルフグレーティングの断面の状況が切り替わる変位量の位置を示した．Au ナノグレーティングの厚さが $0.3 \mu\text{m}$ なので，変位量 $0.3 \mu\text{m}$ 以降は MIM 構造が成立しなくなる．さらに， SiO_2 の厚み分を含めた変位量 $0.5 \mu\text{m}$ を超えると，隣り合うグレーティングのオーバーラップがなくなり，スリット幅 $w_2 = p + w_1$ のグレーティングが支配的になる領域となる．断面状況の変化と計算結果の傾向を比較すると，MIM 構造が成立する領域では位相差増加の傾向，対して，MIM 構造が成立しない領域では位相差減少の傾向があることがわかった．位相差変化量については，波長 $0.8 \mu\text{m}$ において，約 70° の変化が得られる可能性があることが示された．

Table 5.9: グレーティングの設計寸法

		寸法パラメータ	設計値
		グレーティング周期 p	$0.8 \mu\text{m}$
スリット幅 w_1	$0.5 \mu\text{m}$		
Au 厚さ t_1	$0.3 \mu\text{m}$		
SiO_2 厚さ t_2	$0.2 \mu\text{m}$		
グレーティング長さ l	$20 \mu\text{m}$		

5.6.2 製作

考案した製作工程に従って，BRM の試作を行った．

以降は，具体的な製作について説明する．

(a) スパッタリング成膜及び EB 描画パターンニング

20 mm 角の石英ガラス基板を，Table 3.6, 3.7 に示した有機洗浄及びピラニア洗浄工程で洗浄した．その後，スパッタリング装置 (NFTS-3S-R0601, FTS) を使用してエッ

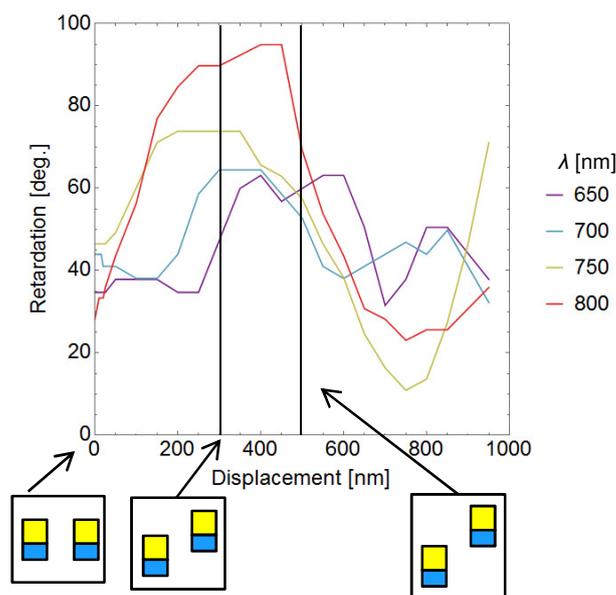


Figure 5.24: 埋込パターンニング型の設計寸法における，変位置に対する位相差変化の数値計算結果．

チングマスク用の Cr を成膜した．成膜時の条件は，Table 3.3 に記載した条件を使用し， $0.25\ \mu\text{m}$ を目標に 23 min 成膜を行った．

続いて，EB 描画で犠牲層パターンを描画した．レジストは，ポジ型の OEBCAP112PM を使用した．作業工程は Table 3.1, 3.2 に記載した通りに実施した．レジスト塗布時のスピコートは，レジスト膜厚をできるだけ厚くするために，2500 rpm で 60 sec 実施した．レジストバーク後，基板のチャージアップを防ぐため，エスペイサを塗布した．露光量は， $5.4\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ，現像は 80 sec 行った．現像後，残渣を除去するために O_2 プラズマアッシングを 30 sec 行った．

(b) Cr エッチング及び RIE によるガラス溝加工

ウェットエッチングでエッチングマスク用 Cr のパターンニングを行った．エッチャントは N14B(日本化学産業) を使用し，1 min 30 sec 浸漬した．EB レジストを残したまま，RIE でガラス基板の溝加工を行った．溝深さは，成膜パターンニング型と同じ厚さの犠牲層となるように， $0.5\ \mu\text{m}$ を目標とした．エッチングガスを SF_6 ガス，RF 電力を 30 W とした条件で 3 min 実施した．エッチング後に段差計で溝深さを測定したところ，約 $0.6\ \mu\text{m}$ であった．

(c), (d) Si 犠牲層埋込

スパッタリング成膜で、ガラス溝に Si 犠牲層を埋め込んだ。実際の溝深さが $0.6 \mu\text{m}$ だったので、 $0.6 \mu\text{m}$ を設計膜厚として、16 min 成膜した。

Si を成膜後、Cr エッチャントに一晩浸漬し、Si のリフトオフを行った。リフトオフし切れない領域が残ったので、テフロンピンセットでなぞり、再度エッチャントに浸漬することで完遂した。

ガラス溝への Si 埋込工程後の予備実験試料の断面 SEM 観察像を Fig. 5.25 に示す。溝深さに合わせてスパッタリング成膜時間を調整することで、5.25(a) のように段差の少ない埋込ができることを確認した。しかしながら、溝の端部はマスクの影となって膜厚がやや薄くなり、段差が残ってしまうことが分かった (Fig. 5.25(b))。

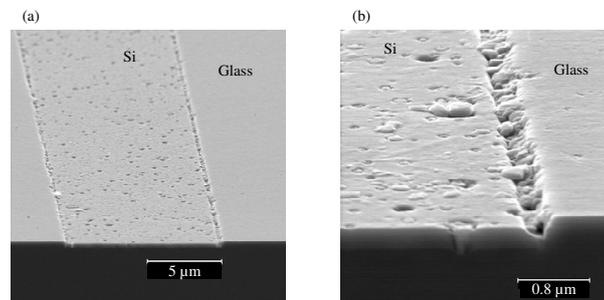


Figure 5.25: ガラス溝への Si 埋込工程後の試料の断面 SEM 観察像。(a) 犠牲層を俯瞰した観察像。(b) 犠牲層パターン端部の拡大図。

続いて、(e)~(j) の工程で Si 犠牲層の上にグレーティング構造を製作した。工程の詳細は成膜パターンニング型と同様のため割愛した。

形状評価

試作した埋込パターンニング型 BRM の SEM 観察像を Fig. 5.26 に示す。リリースされたグレーティングは、破断することなく自立状態を維持した。しかしながら、拡大して観察すると、梁が座屈していることがわかった (Fig. 5.26(b))。座屈の状況を確認するため、レーザ顕微鏡 (VK-X250, KEYENCE) を使用して、表面形状の観察を行った。試作した BRM の表面形状の 3 次元プロファイルを Fig. 5.27 に示す。観察結果より、グレーティングが凸または凹方向に座屈していることが明らかになった。また、凸方向に座屈したグレーティングの初期変位は、約 $1 \mu\text{m}$ に及んでいることが分かった。

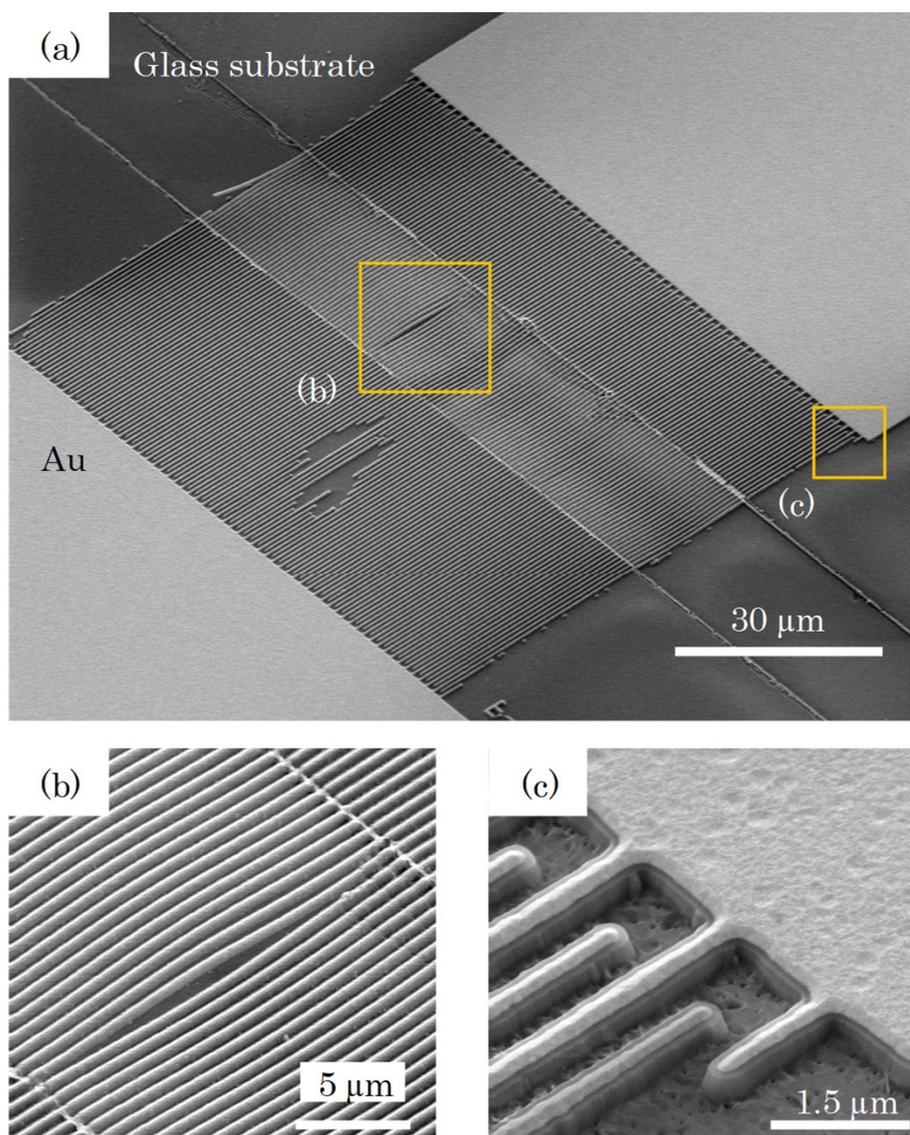


Figure 5.26: 試作した埋込パターンニング型 BRM の SEM 観察像. (a) グレーティング全体. (b) グレーティング部分の拡大図. (c) グレーティング端部の電源に接続する部分.

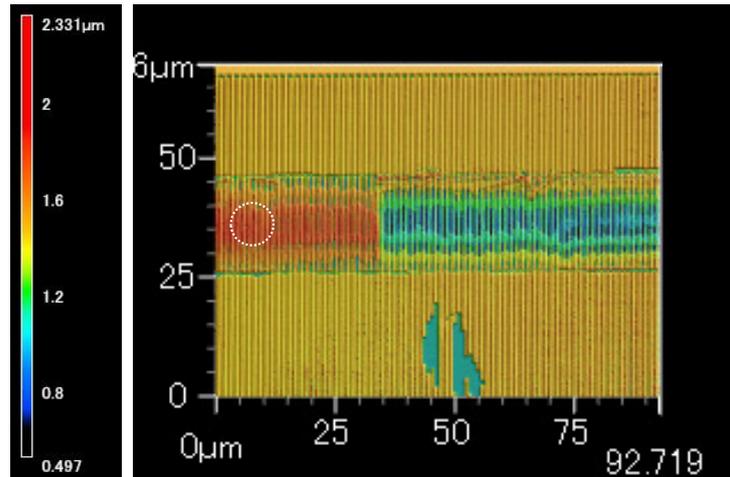


Figure 5.27: レーザ顕微鏡で測定した，埋込パターンニング型 BRM の表面形状 3 次元プロファイル．図中の白丸は，光学特性を評価したスポット．

5.6.3 光学特性の評価

凸方向に座屈したグレーティング領域で，光学特性の評価を行った．測定した領域を Fig. 5.27 中に白丸で示した．測定環境は，時間制御型と同じ条件に設定した．電圧の印加は，ソースメータ 2410(KEITHLEY) を定電流源として使用して行った．素子に印加された電圧は，固定爪の端子に電圧計を並列に接続して測定した．測定は，各電圧印加時の条件でそれぞれ 2 回ずつ測定し，平均値を取得した．本測定では，検光子角度 15° 毎に $0^\circ \sim 180^\circ$ までの透過光強度を取得した．印加電圧 1.54 V の結果のみ，再現実験中に素子が焼損してしまったため，1 回の測定データを記載した．

試作した BRM の位相差変化特性の測定結果を Fig. 5.28 に示す．印加電圧を $0 \sim 1.54$ V まで変化させたところ，主に波長 $0.6 \mu\text{m}$ 付近で位相差変化が生じた．位相差変化量の値だけを見ると，ここまで述べてきた電熱駆動方式の BRM の中で最も大きい，初期位相差は，波長 $0.5 \mu\text{m} \sim 0.8 \mu\text{m}$ の範囲で，成膜パターンニング型よりも小さくなった．初期位相差が小さくなったのは，Au 層が過剰にエッチングされてしまったことであると推測される．

特定波長における印加電圧に対する位相差の変化を Fig. 5.28(b) に示した．波長 $0.5 \mu\text{m}$ で， $+4.4^\circ (5.8^\circ \sim 10.2^\circ)$ ，波長 $0.6 \mu\text{m}$ で $+6.6^\circ (8.7^\circ \sim 15.3^\circ)$ の位相差変化が生じたが，より長波長側では有意な変化は見られなかった．

Fig. 5.29 より，Si 犠牲層の埋込時に生じた段差部分に金属が残存していることがわかった．非駆動梁と駆動梁の短絡が生じている可能性があることから，成膜パターンニ

グ型において問題となった段差部分の短絡は、本工程でも生じることがわかった。また、この短絡により、提案する面外駆動が正常に動作しなかったと考えられ、位相差変化が小さくなったと推測される。

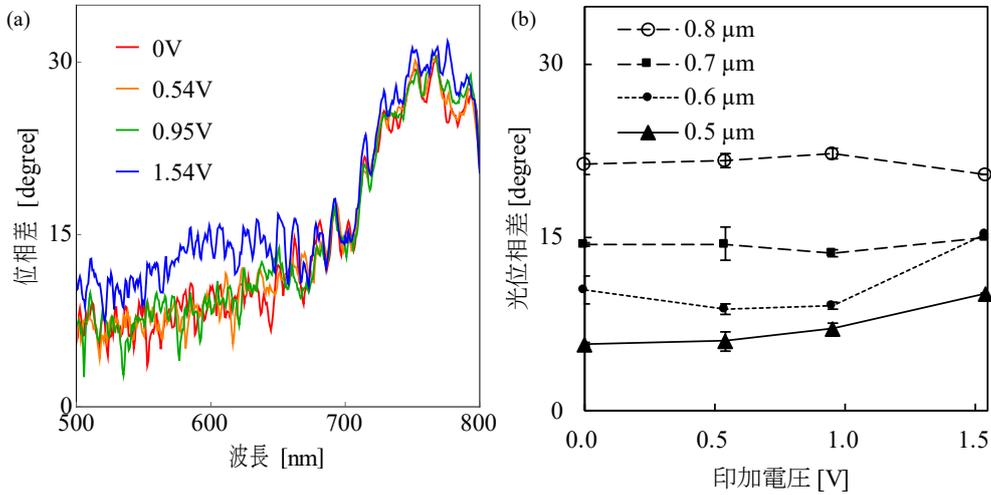


Figure 5.28: 埋込パターンニング型の位相差変化特性の測定結果. 印加電圧 1.54 V の実験を除き、それぞれ 2 回測定した平均値. (a) 印加電圧 0 V~1.54 V における位相差スペクトル. (b) 各波長ごとの印加電圧に対する位相差の変化. エラーバーは、2 サイクル分の測定データの標準偏差.

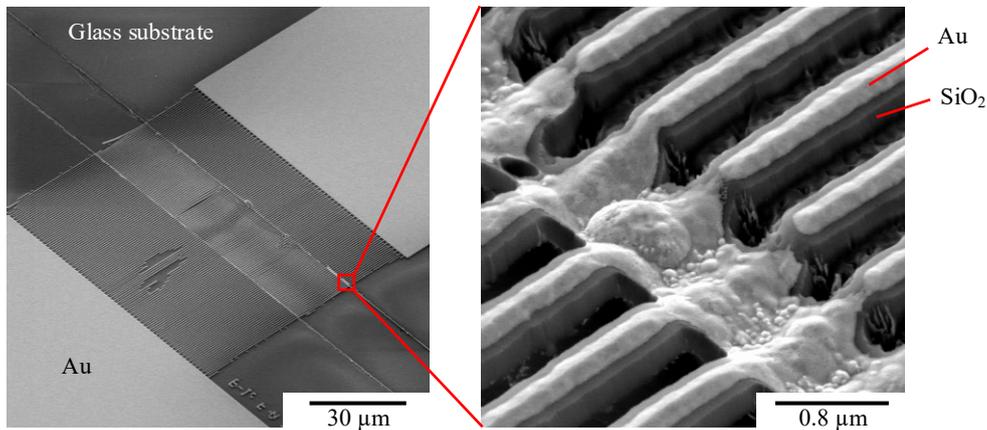


Figure 5.29: Si 犠牲層埋込時に生じた段差部分に残存する金属の SEM 観察像.

Fig. 5.30 に、透過率スペクトルの変化を示す. TE, TM 偏光のいずれについても、印加電圧の増加に伴って、波長 0.5 ~ 0.7 μm 付近の透過率ピークが長波長側にシフトした. この要因は、凸方向の座屈が生じたことによって、グレーティングと基板間のギャップ

が想定より大きくなり、薄膜干渉が生じたことに因るものと考えられる。薄膜干渉は、ギャップの長さが大きくなるほど干渉ピーク波長が大きくなる傾向があるので、結果の傾向と一致する。試作した素子の観察中にデジタルマイクロスコープで撮影した、印加電圧の有無によるグレーティングの画像を Fig. 5.31 に示す。凸領域のグレーティングに薄膜干渉に因ると思われる干渉色の変化が生じ、やや緑色だった梁中央部が、やや赤色 (長波長側) に変化していることが確認できる。

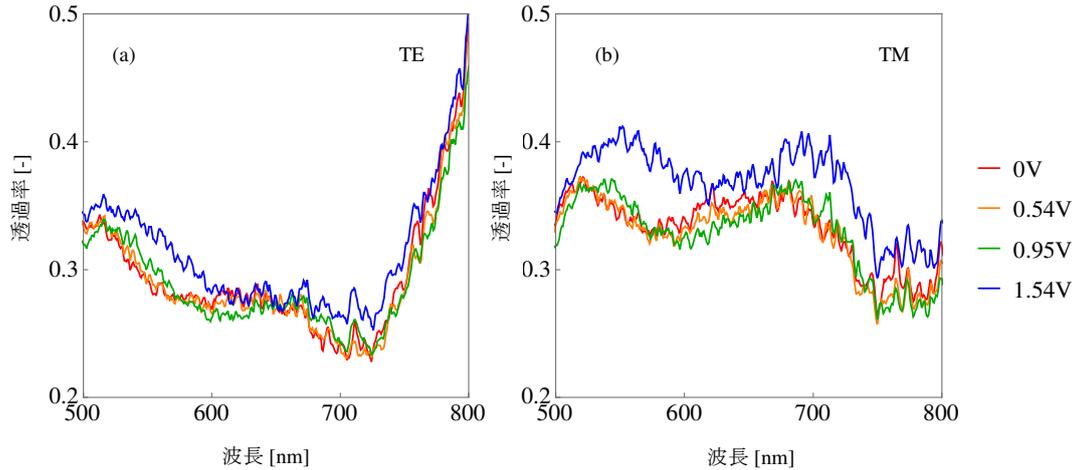


Figure 5.30: TE, TM 偏光の振幅透過率スペクトル.

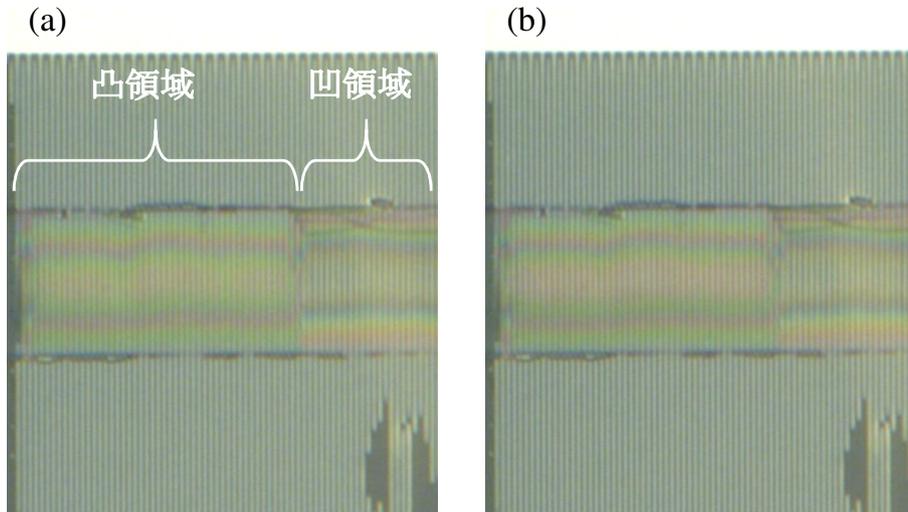


Figure 5.31: 印加電圧の有無によるグレーティング凸領域の色の变化. (a) 印加電圧なし. (b) 印加電圧 0.96 V.

5.6.4 透過率変化の検証

Fig. 5.30 の透過率スペクトルに示すように、本工程で製作した素子は明確な透過率の変化を生じた。この透過率変化をもとに、バイモルフ梁の変形を考察した。Fig. 5.26 に示した試作は、前述したように焼損してしまったため、別の試作で、改めて光学特性の測定を行った。透過率変化検証用の試作の設計寸法を Fig. 5.32 に示す。また、この試作は、全ての梁が電極に接続した導通梁になるように、パターンを変更して製作した。工程及び条件は、「埋込パターンニング型」の BRM から変更せず実施した。

透過率の変化を理論的に解析するため、フレネル反射及び Fabry-Pérot 干渉の理論を適用する。まず、Fig. 5.32 に示すように、電熱駆動型 BRM の断面構造を 5 層の多層膜構造でモデル化した。多層膜構造は、屈折率の異なる 5 つの層（光の透過側から空気層、Au グレーティング層、誘電体層、エアギャップ層、石英ガラス層）で構成されているとみなすことができる。各層の厚さ h^i 及び偏光方向ごとの屈折率 $n_{TE, TM}$ は、それぞれ添字 0~4 で識別する。また、 p はグレーティングの周期、 w はスリット幅である。

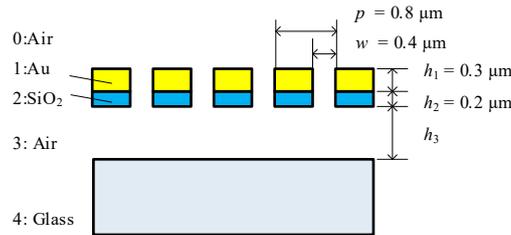


Figure 5.32: 解析に用いた断面構造モデル及び設計寸法。

続いて、解析モデルの透過率を理論的に導出した。透過率検証に用いる試作は、全ての梁が駆動するようにパターンを変更しているため、面外駆動によってエアギャップ層の厚さ h_3 のみが増加すると仮定した。フレネル反射及び Fabry-Pérot 干渉の理論より、ガラス基板側から各層を透過して空気側へ出射した光の透過率 T は、次の式で表される。

$$T = t_{43210} \cdot t_{43210}^* / n_4 \quad (5.18)$$

ここで n_4 は石英ガラス層の屈折率で、透過係数 t_{43210} は、

$$t_{432} = \frac{t_{43}t_{32} \exp(-2i\pi n_3 h_3 / \lambda)}{1 - r_{34}r_{32} \exp(-4i\pi n_3 h_3 / \lambda)}$$

$$t_{4321} = \frac{t_{432}t_{21} \exp(-2i\pi n_2 h_2 / \lambda)}{1 - r_{23}r_{21} \exp(-4i\pi n_2 h_2 / \lambda)}$$

⁴本論文では一貫して層の厚さを t で定義してきたが、フレネル透過係数に t を用いたいため、ここでの議論のみ h で定義する。

$$t_{43210} = \frac{t_{4321} t_{10} \exp(-2i\pi N_1 h_1 / \lambda)}{1 - r_{12} r_{10} \exp(-4i\pi N_1 h_1 / \lambda)}$$

で表される。また、 t_{43210}^* は t_{43210} の複素共役である。ここで、 h_i は各層の厚さ、 n_i は各層の屈折率、 N_1 は Au ナノグレーティングの複素屈折率である。 t_{ij} 及び r_{ij} は、入射側の i 層と透過 (反射) 側の j 層の境界面で定義されるフレネル透過係数及びフレネル反射係数である。フレネル係数は、屈折率の異なる 2 種類の物質の界面で生じる反射及び透過の振幅を決定する係数である。垂直入射を想定した時、 t_{ij} 及び r_{ij} は、界面を形成する物質の屈折率によって決まり、次式より求められる⁵。

$$t_{ij} = \frac{2n_i}{n_i + n_j}, \quad r_{ij} = \frac{n_i - n_j}{n_i + n_j}$$

このように、フレネル係数を導出するには、各層の屈折率を導出しておく必要がある。Au グレーティング層の偏光方向ごとの複素屈折率 N_{1TE} , N_{1TM} の導出には、第 2 章で示した式 (2.4), (2.5) より求めた伝搬定数 k_{TE} , k_{TM} を用いた。誘電体グレーティングの有効屈折率 n_{2TE} , n_{2TM} の導出には、式 (5.14), (5.15) を用いた。

透過率変化検証用の試作の SEM 観察像を Fig. 5.33 に示す。Fig. 5.33(a) は素子全体を俯瞰した図であり、右上及び左下の Au が電極へと繋がる配線パターンとなっている。リリースされたグレーティングを拡大したのが Fig. 5.33(b) である。レーザ顕微鏡で表面形状の 3 次元プロファイルを測定した結果を Fig. 5.34 に示す。リリースされたグレーティング構造は、Fig. 5.33(b) で拡大観察した部分を境に、左側は凸方向に、右側は凹方向に座屈していることがわかった。また、凸方向に座屈した部分では、初期のエアギャップが $1.108 \mu\text{m}$ となっていることがわかった。加えて、埋込パターンニング型 BRM と同様に工程 (i) のエッチングを過剰に行った影響で、Au の厚みが設計値の $0.3 \mu\text{m}$ から $0.12 \mu\text{m}$ まで減少した。

製作した試作は、Au 層が設計より薄くなってしまっただけでなく、Fig. 5.35(a) の SEM 観察像で示すように断面が三角形状となった。また Au のスリット幅は設計値より広くなり、対して SiO_2 のスリット幅は狭くなった。これらの加工誤差を踏まえて各寸法を調整した等価モデルを Fig. 5.35(b) に示す。

埋込パターンニング型 BRM と同様の手法で、試作した素子の光学特性評価を行った。測定に用いた領域を Fig. 5.34 中に白丸で示した。測定スポットは、20 倍対物レンズとコア径 $100 \mu\text{m}$ の光ファイバを使用することで、 $5 \mu\text{m}$ になるように設定した。素子の焼損を防ぐため、素子へ印加される電圧が 1 V 未満になるように、定電流源の電流値を制限して実験を行った。

⁵一般にフレネル係数は、入射面を基準とした時の偏光方向によって式が異なる。ただし、垂直入射の場合は、入射面が定義できないため、偏光方向の区別がなくなる。厳密には方向の定義が異なる場合がある。これについては『物理光学』[85, p. 23]などで解説されている。

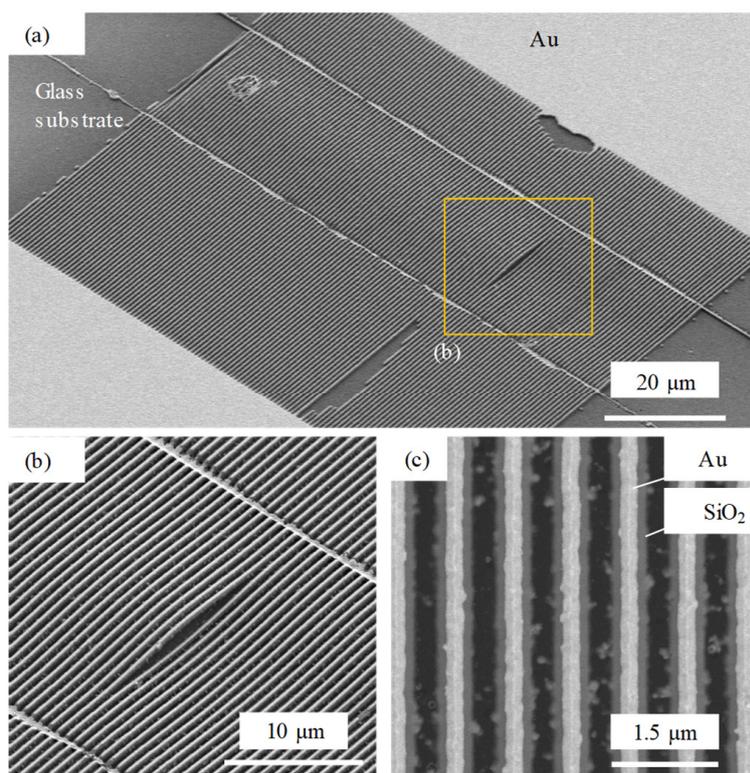


Figure 5.33: 製作した透過率変化検証の試作の SEM 観察像. (a) 全体を俯瞰した観察像. (b) リリース後に座屈したグレーティングの拡大観察像. (c) グレーティングの直上からの拡大観察像.

印加電圧 0, 0.44, 0.82 V の時の TE 方向の振幅透過率スペクトルの測定結果, 及び加工誤差を踏まえて各寸法を調整した等価モデル (Fig. 5.35) を用いた透過率の理論計算結果を Fig. に示す. 理論計算は, 試作の初期エアギャップが $1.108 \mu\text{m}$ になったことを考慮し, 波長 $0.55 \mu\text{m}$ 付近の干渉ピークが実測値と一致するエアギャップを探索したところ, それぞれ $1.075, 1.115, 1.155 \mu\text{m}$ となった. この結果より, 透過率変化検証用の本試作において, $0 \sim 0.82 \text{ V}$ の電圧印加により, 約 $0.08 \mu\text{m}$ の面外駆動が生じたと見積もることができた.

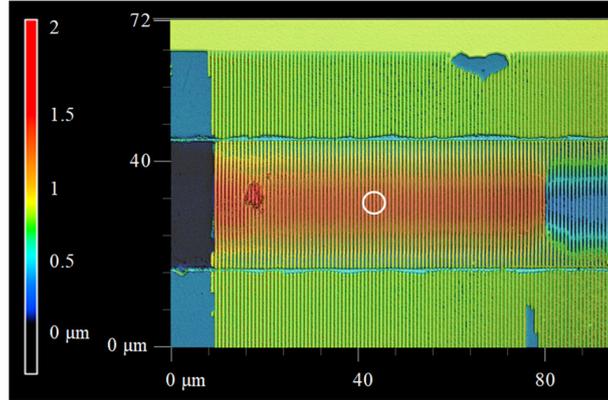


Figure 5.34: レーザ顕微鏡で測定した表面形状 3次元プロファイル.

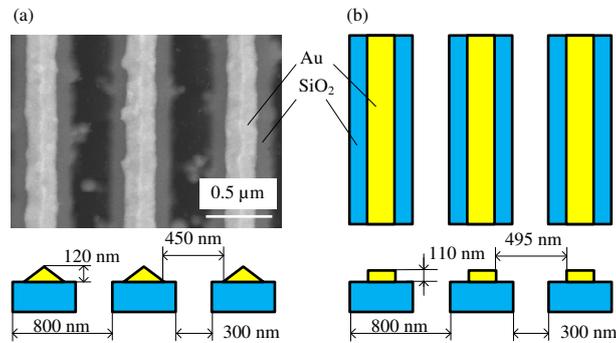


Figure 5.35: (a) 試作した素子を拡大した SEM 観察像と断面構造の寸法. (b) 試作した素子の加工誤差を考慮した等価解析モデル.

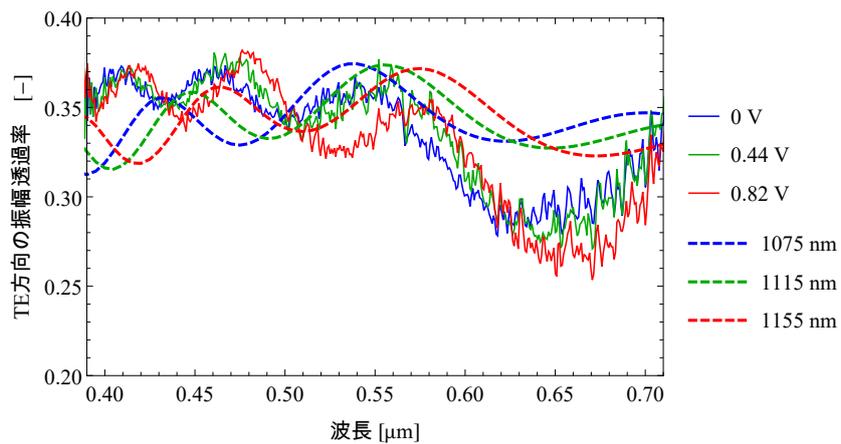


Figure 5.36: 透過率変化検証用素子における TE 方向の振幅透過率スペクトルの測定結果, 及び加工誤差を考慮した等価モデルを用いた透過率の理論計算結果.

5.6.5 製作工程 III に対する考察

本試作では、リリース後に梁が座屈してしまった。成膜パターンニング型の SEM 観察像と比較すると、本試作では、グレーティングをエッチングする際にマスクとして使用した Cr 層が完全に消失していた。スパッタリング成膜で残留する応力は、金属膜では引張り、誘電体膜では圧縮の傾向があることが、経験的にわかっている。そのため、Cr マスク層が残存していた成膜パターンニング型では、引張りの残留応力が支配的となったのに対し、本試作では、Cr マスク層の消失によって Au 層がエッチングされて減少し、SiO₂ 層で生じた圧縮の残留応力が支配的となったと推測される。したがって、エッチング条件を見直し、Au 膜厚が維持されるように調整することができれば、リリース時の座屈は回避できると考えられる。Au 膜厚の維持は、初期位相差を大きくする点においても重要な改善点である。

5.7 製作と評価 IV (保護膜パターニング型)

ここまで、犠牲層をパターニングしてから Au 層を成膜する工程の試作を行ってきたが、段差部分で断線が生じる課題を解決することができなかった。加えて、オーバーエッチングによる Au 層の減少の問題が新たに生じたため、エッチングマスクについても検討する必要があることがわかった。

そこで、この2つの課題を解決する製作工程を再度考案した。

Fig. 5.38 に考案した製作工程を示す。まず、犠牲層エッチングに関する工程について説明する。本工程では、「時間制御型」と同様に犠牲層 Si 層を基板全体に成膜する。グレーティング構造の製作を完遂させたのち、フォトリソグラフィによるパターニングを行い、犠牲層を除去する部分以外の領域をレジストで保護する。つまり、「成膜パターニング型」及び「埋込パターニング型」では先に犠牲層のパターニングを行ったが、グレーティングの製作を先に行ってしまう工程に変更した。これにより、これまでグレーティングと犠牲層パターンのアライメント要求精度を緩和するために用意しておいたマージンを、図面はそのままに工程を逆にすることによって、犠牲層エッチングの時間制御のためのマージンとして利用することができる (Fig. 5.37)。このマージンは、エッチング進行長さで見ても 25~50 μm 程度取ることができるため、1 μm 未満で制御しようとしていた「時間制御型」よりも制御の要求を大きく緩和することができる。

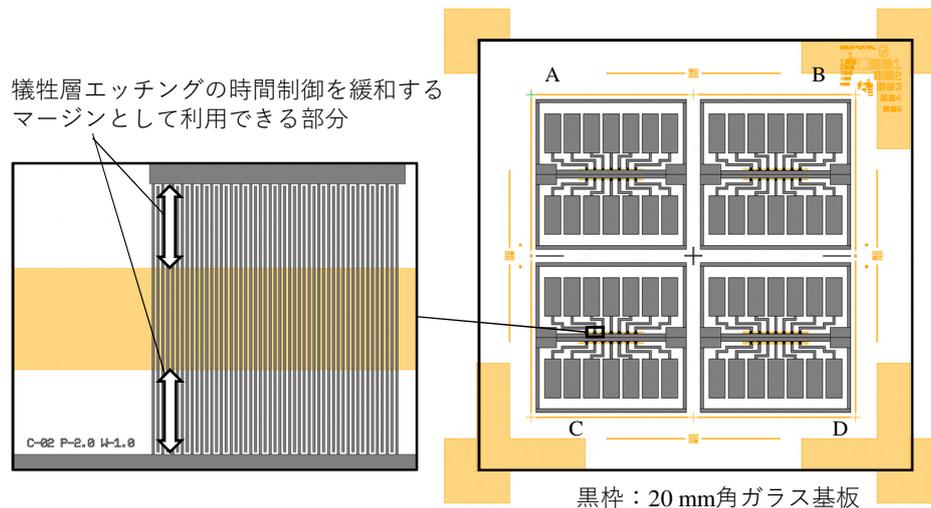


Figure 5.37: 設計パターンの2次元CAD. 赤色のパターンがEBで描画する金属パターン, 青色のパターンがフォトリソグラフィで露光するSiパターンである. EB描画用のパターンはややアレンジを加えたが, SiパターンはFig. 5.18から変更していない.

続いて、Au 層エッチングのためのマスクの検討について説明する。まず、これまでの製作工程では Au 層を維持しにくかった理由の一つとして、Cr マスクを真空蒸着で成膜していたことが挙げられる。Fig. 5.16 でも示したように、真空蒸着による厚膜の成膜では、断面形状の垂直性が悪い。これにより、想定よりも Cr マスクが消失し、Au 層の減少に繋がったと考えた。そこで、RIE の垂直性を利用して、Cr マスクも速く RIE によってパターニングすることを発案した。しかしながら、Cr は RIE 耐性が強いいためエッチングマスクとして採用していたので、その Cr を RIE でエッチングするには、Cr と同等あるいはより強いエッチング耐性を持つ材料を選定する必要がある。さらに、Cr の垂直性を維持するためには、そのエッチングマスクについても、高い垂直性が求められる。

この、ある種矛盾するような特性を持つエッチングマスクの選定に際して、本研究では、これまで犠牲層として利用してきた Si の RIE 耐性に着目した。予備実験によって導出したエッチングレート (Table 3.4) より、Si は、SF₆ ガス RIE では高速にエッチングされ、Ar ガス RIE では強いエッチング耐性を示すことがわかっている。そのため、Si は、パターニングを SF₆ ガス RIE で行い、マスク材として利用する際は Ar ガス RIE を行うという使い方ができる、という発想に至った。

以上の 2 点の改善を踏まえ、考案した製作工程による試作を実施した。レジスト保護膜をパターニングすることで、犠牲層の選択的エッチングを行うことから、本試作を「保護膜パターニング型」と呼称する。

5.7.1 数値解析による位相差変化量の見積もり

まず、設計寸法で得られる位相差変化を見積もるために、FDTD 法による数値解析を行った。グレーティングの設計寸法は、Table 5.10 に示す値に設定した。Fig. 5.6 に示したモデルに設計寸法を適用し、計算を行った結果を Fig. 5.39 に示す。変形量に対して位相差がほぼ横ばいとなり、Au 膜厚を超える変形量となったときに、急激に位相差が減少する傾向となった。位相差変化については、波長 0.532 μm において約 270°, 0.633 μm において約 340° の変化が得られる可能性があることが示された。

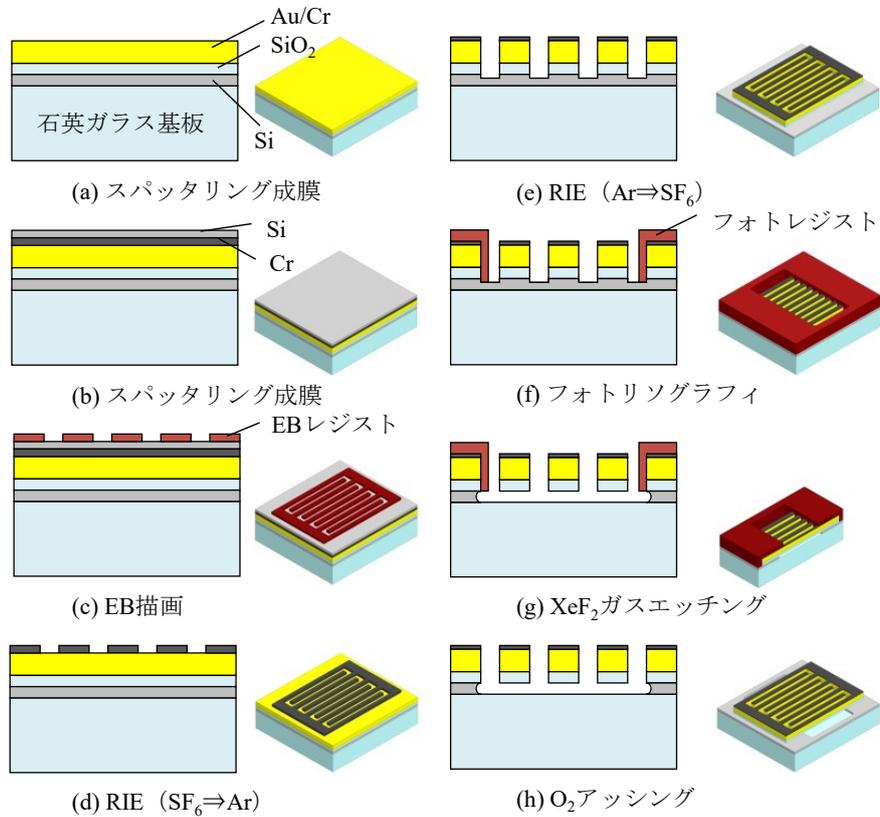
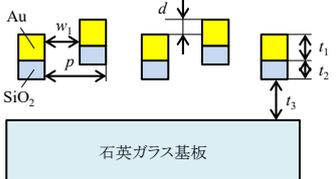


Figure 5.38: 保護膜パターンニング型の製作工程. (a) ガラス基板に Au/接着層 Cr/SiO₂/犠牲層 Si をスパッタリング成膜した. (b) 続いて, エッチングマスクとして使用する Si/Cr をスパッタリング成膜した. (c) EB 描画でグレーティング及び電極パターンを描画した. (d) レジストをマスクとして, SF₆ ガス RIE を行い Si マスクをパターンニングした. 続いて Si をマスクとして Ar ガス RIE を行い, Cr マスクをパターンニングした. (e) Cr をマスクとして Ar ガス RIE を行い, Au 層をエッチングした. 続いて SF₆ ガス RIE を行い, Cr/SiO₂ 層をエッチングした. (f) グレーティングパターンに合わせてフォトリソグラフィを行い, 犠牲層を除去する部分以外の領域をレジストで保護した. (g) XeF₂ ガスエッチングを行い, 露出した領域の Si 犠牲層をエッチングした. (h) 最後に, O₂ アッシングを行い, レジスト保護膜を除去した.

Table 5.10: グレーティングの設計寸法

寸法パラメータ		設計値
	グレーティング周期 p	0.5 μm
	スリット幅 w_1	0.24 μm
	Au 厚さ t_1	0.4 μm
	SiO ₂ 厚さ t_2	0.2 μm
	グレーティング長さ l	20 μm
	石英ガラス基板	

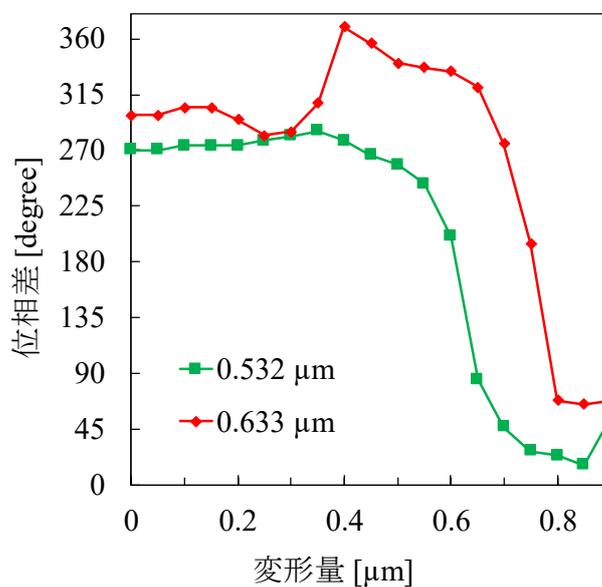


Figure 5.39: 保護膜パターニング型の設計寸法における，変位量に対する位相差変化量の数値計算結果。

5.7.2 製作

考案した製作工程に従って、BRMの試作を行った。

以下、製作工程の詳細について述べる。

(a) Au/接着層 Cr/SiO₂/犠牲層 Si のスパッタリング成膜

ガラス基板をディポッシュ洗浄と有機洗浄で洗浄し、Au/接着層 Cr/SiO₂/犠牲層 Si のスパッタリング成膜を行った。設計膜厚及び成膜時間を Table 5.11 に示す。Au 成膜は、長時間の成膜による基板の過熱を考慮して、2回に分割して実施した。

Table 5.11: スパッタリング成膜条件

-	設計膜厚	成膜時間
Au	0.4 μm	27 min 24 sec
Cr(接着層)	0.01 μm	1 min
SiO ₂	0.21 μm	16 min 30 sec
Si(犠牲層)	0.2 μm	5 min 15 sec

(b) エッチングマスク Si/Cr のスパッタリング成膜

続いて、エッチングマスク用の Si 及び Cr をスパッタリング成膜した。設計膜厚及び成膜時間を Table 5.12 に示す。

Table 5.12: スパッタリング成膜条件

-	設計膜厚	成膜時間
Si	0.05 μm	1 min 20 sec
Cr	0.02 μm	2 min

(c) EB 描画によるグレーティング及び電極パターンニング

大面積の電極パターンと微細グレーティングパターンを同時に描画するために、高速大面積描画が可能な F5112+VD01 を利用した。これまでリフトオフ工程で用いてきたパターンを反転させる必要があるため、EB レジストは、ネガ型の OEBRCAN40-AE2cp を使用した。薄膜のレジストだが、比較的安定して描画できることを予備実験で確認した。作業工程は Table 3.1, 3.2 に記載した通りに実施した。レジスト塗布時のスピナー

トは、3000 rpm で 60 sec 実施した。のちの段差測定より、膜厚は 140 nm となったことを確認した。レジストベーク後、基板のチャージアップを防ぐため、エスペイサを塗布した。露光量は、標準条件が $23\sim 25 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ であったが、同じ膜を成膜した基板の予備実験を参考にして $19.0 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ とした。現像後、残渣を除去するために O_2 プラズマアッシングを 7 sec 行った。

(d) SF_6 ガス RIE 及び Ar ガス RIE によるマスクパターニング

まず、EB レジストをマスクとして用いた SF_6 ガス RIE を行い、Si マスクのパターニングを行った。RF 電力を 30 W とした条件で 13 sec 実施した。Cr と Si は目視では判断がつかないため、テスターを用いて簡易的に表面の膜の確認を行った。レジストパターンのない部分は、端子を約 10 mm 離れた状態で、最も低レンジで 0Ω であったため、ほぼ導体であることが確認できた。対して Si 膜表面は、端子を約 10 mm 離れた状態で数 $\Omega \sim 100 \Omega$ 程度の抵抗を示した。したがって、簡易的ではあるが、Cr 層が露出したことを確認できたため、次の工程に移行した。またこの時、非常に短時間のエッチングにより、EB レジストはほぼ残存した状態でエッチングを完遂した。

EB レジストを残した状態⁶で、EB レジストと Si をマスクとして用いた Ar ガス RIE を行い、Cr マスクのパターニングを行った RF 電力を 30 W とした条件で 16 min 実施した。長時間のエッチングのため、2 回に分けて実施した。

予備実験における工程 (d) 前後のマスク形状の SEM 観察を Fig. 5.40 に示す。(a), (b) は周期 $0.6 \mu\text{m}$ 、スリット幅 $0.24 \mu\text{m}$ 、(c), (d) は周期 $0.5 \mu\text{m}$ 、スリット幅 $0.24 \mu\text{m}$ のエッチング前後の観察像である。このように、提案したエッチングマスク加工工程で、EB レジストとほぼ同寸法のマスクを製作することができた。ややパターンが細くなったが、おそらく SF_6 ガス RIE で Si をエッチングした際のサイドエッチングの影響と推測される。RIE 後のパターン端部にやや波のような乱れが生じているが、現像後のレジスト残渣の影響と考えられる。

⁶Si の SF_6 ガス RIE は、成膜パターニング型の項で述べたように、ややサイドエッチングが入ってしまう。そのため、マスクの原型となる EB レジストを除去せず、できるだけパターン形状が Cr に転写されやすくなるようにした。

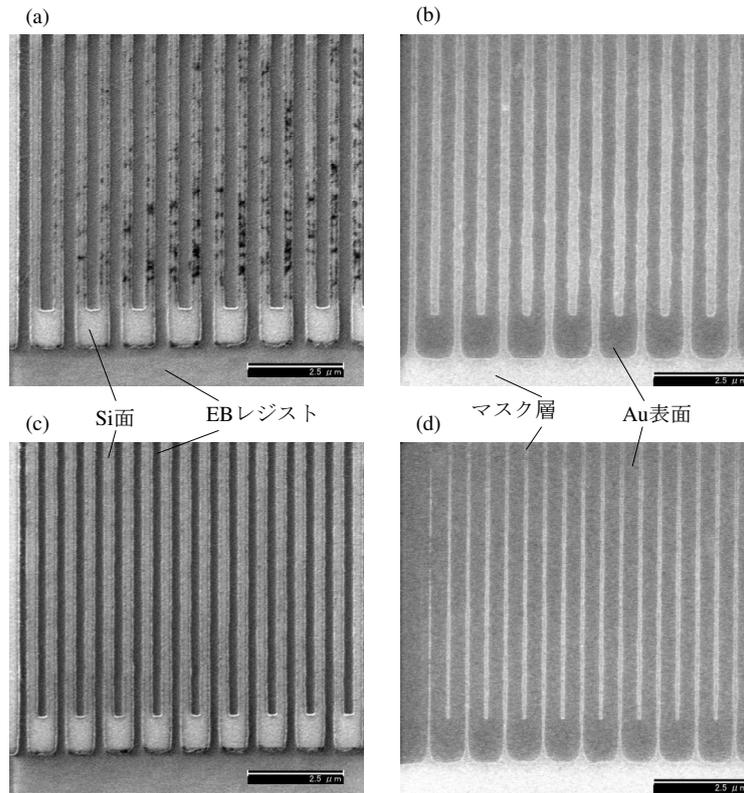


Figure 5.40: EB 描画後のレジストと、RIE 後のマスクの SEM 観察像. (a),(b) 周期 0.6 μm , スリット幅 0.24 μm のエッチング前及び後の観察像. (c),(d) 周期 0.5 μm , スリット幅 0.24 μm のエッチング前及び後の観察像. スケールバーは全て 2.5 μm .

(e) Ar ガス RIE による Au 層をエッチング及び SF₆ ガス RIE による Cr/SiO₂ 層エッチング

Cr マスクパターンを用いて、Au/接着層 Cr/SiO₂ のエッチングを実施した。まず、Ar ガス RIE による Au 層のエッチングを行った。RF 電力を 30 W とした条件で 10 min 実施した。長時間のエッチングのため、2 回に分けて実施した。続いて、SF₆ ガス RIE による Cr/SiO₂ 層エッチングを行った。RF 電力を 30 W とした条件で、3 min 実施した。

(f), (g) フォトリソグラフィによる保護膜パターンニング及び XeF₂ ガスエッチング

フォトリソグラフィを用いて、犠牲層 Si を除去する部分以外の領域をレジストで保護した。フォトマスクは、成膜パターンニング型及び埋込パターンニング型で犠牲層パターンニングのために用いたマスクを使用した。レジストはポジ型の OFPR-800LB を使用し、Table 3.2 に記載したとおりに作業を実施した。

XeF₂ ガスエッチングを行う前に、RIE を用いて疑似的なアッシング及び酸化膜除去を行った。SF₆ ガスを用い、RF 電力 30 W、チャンバ圧力 0.5 Pa で 30 sec 実施した。

その後、XeF₂ ガスエッチングを行った。エッチング条件は標準条件とし、エッチングサイクルを 2 回行った。基板を裏面から観察したところ、犠牲層エッチングが進行していないことがわかったので、再度 RIE による疑似アッシングを行ったのち、適宜観察を行いながら、XeF₂ ガスエッチングサイクルを計 5 回実施した。2 サイクル実施後及び追加の 5 サイクル実施後の、基板裏面からのデジタルマイクロスコープ観察像と、追加 5 サイクル実施後の表側からの観察像を Fig. 5.41 に示す。Fig. 5.41(b) の裏面観察像より、犠牲層の被エッチング部とグレーティングパターン端部の間隔が、最も近い部分でも 20 μm 以上あることがわかり、XeF₂ エッチングの時間制御に成功していることがわかった。表面からの観察では、犠牲層リリースの進行状況は確認できなかったが、グレーティングパターンが大きく破損することなくリリースできていることが確認できた。

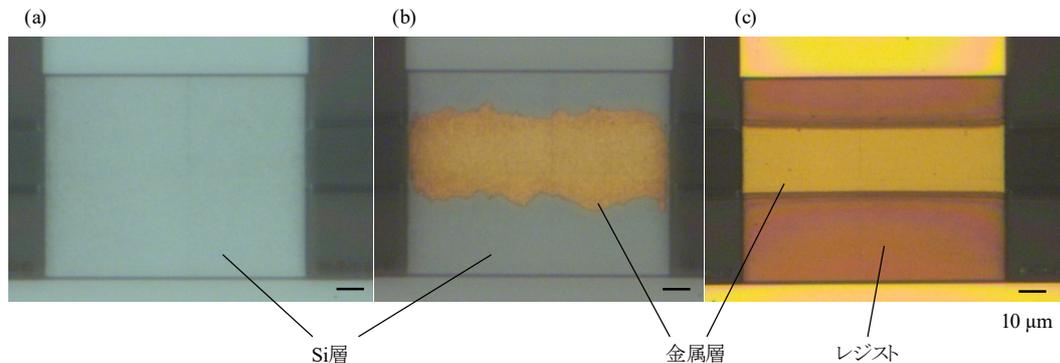


Figure 5.41: XeF₂ ガスエッチング後の BRM のデジタルマイクロスコープ観察像。灰色の部分が Si 層，黄色の部分が金属層。(a) 2 サイクル実施後の裏側観察像。(b) 追加 5 サイクル実施後の裏側観察像。(c) 追加 5 サイクル実施後の表側からの観察像。スケールバーは全て 10 μm。

(h) O₂ アッシングによるレジスト保護膜の除去

最後に、O₂ アッシングによってレジスト保護膜を除去した。アッシング装置 FA-1 を使用して、RF 電力 100 W の標準条件で 12 min 実施した。

形状評価

試作した保護膜パターニング型 BRM の SEM 観察像を Fig. 5.42 に示す。リリースされたグレーティングは、破断することなく自立状態を維持した。また、拡大して観察

しても、座屈している様子は見られなかった。Fig. 5.42 (b) より、Cr マスクが消失していることと、ガラス基板を大きくエッチングしてしまっていることが確認され、ややオーバーエッチングであったことがわかった。Au 膜厚はやや減少したが、これまでの試作と比較すると厚い Au 層が維持できた。スリット幅は、平均して $0.10 \mu\text{m}$ 程度まで狭くなった。Fig. 5.40 (d) のマスクパターンと比較すると、スリット幅が大きく減少していることがわかる。

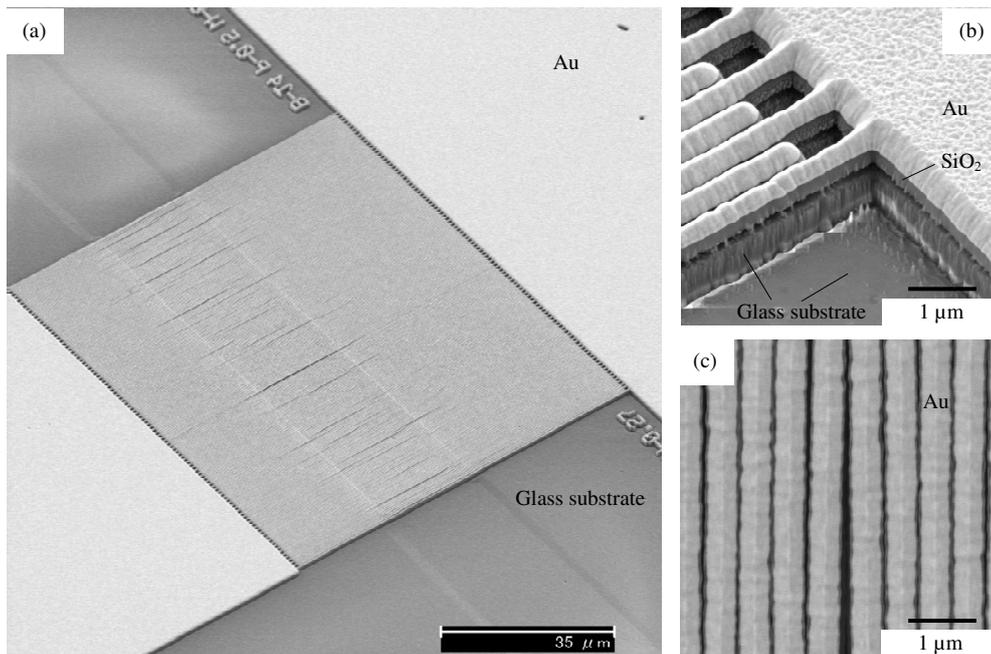


Figure 5.42: 試作した保護膜パターニング型 BRM の SEM 観察像。(a) グレーティング全体。(b) グレーティング端部の電源に接続する部分。(c) グレーティング部分直上からの観察像。

Fig. 5.42 (c) より、グレーティングのスリット幅が不規則に広がっている部分が散見され、梁同士のスティックが生じた可能性があることがわかった。これについては、スリット幅が極端に減少したことが要因と考えられる。最終的なスリット幅は、平均して $0.10 \mu\text{m}$ 程度まで狭くなった。Fig. 5.40 に示したエッチングマスクの観察像ではほぼ EB レジストパターンを反映していたため、のちの RIE 工程で減少したと推測される。Ar ガス RIE の予備実験において、Au 梁が鉛直方向からつぶされていく、展性のような変形を示すことがあった。したがって、本試作でも Ar ガス RIE 中に Au が広がっていくような変形を生じ、スリット幅が減少したと推測される。

5.7.3 光学特性の評価

試作した BRM の中央部で、光学特性の評価を行った。測定環境は、時間制御型と同じ条件に設定した。電圧の印加は、ソースメータ 2410(KEITHLEY) を定電流源として使用して行った。素子に印加された電圧は、ソースメータの電圧計を見ることによって確認した。本測定では、検光子角度 15° 毎に $0^\circ \sim 180^\circ$ までの透過光強度を取得した。測定は、各電圧印加時の条件でそれぞれ 2 サイクル行い、その平均値を算出することによって取得した。

試作した BRM の位相差変化特性の測定結果を Fig. 5.43 に示す。印加電圧を $0 \sim 2.9$ V まで変化させたところ、主に波長 $0.532 \mu\text{m}$ 付近で位相差変化が生じた。また初期位相差は、波長 $0.5 \mu\text{m} \sim 0.8 \mu\text{m}$ の範囲で、これまでの試作と比較して最も大きな値となった。これは、スリット幅が狭くなったことが一番の要因と考えられる。特定波長における印加電圧に対する位相差の変化を Fig. 5.43(b) に示した。波長 $0.532 \mu\text{m}$ で、 -7.6° ($86.2^\circ \sim 78.6^\circ$) の位相差変化が生じた。本試作のグレーティング構造は、約 3 V の電圧印加実験中に焼損した。

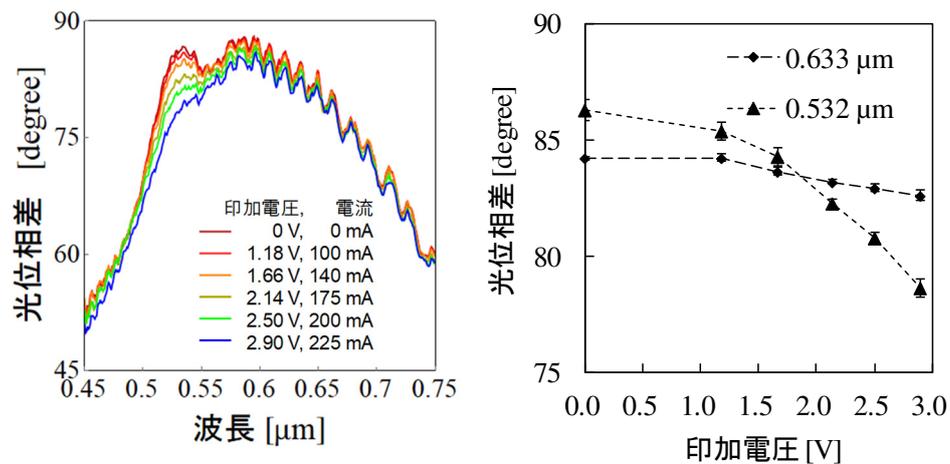


Figure 5.43: 印加電圧 0 V \sim 2.9 V における保護膜パターンニング型 BRM の位相差変化の測定結果。(a) 位相差スペクトル。(b) 特定波長ごとの印加電圧に対する位相差の変化。エラーバーは、2 サイクル分の測定データの標準偏差。

5.7.4 製作工程 IV に対する考察

本試作において、リリースされたグレーティングからは、座屈している様子は見られなかった。この一番の要因として、Au 層が比較的厚いまま維持され、引張の残留応力

が支配的になったことが挙げられる。加えて、グレーティングパターンに EB レジスト形状が比較的綺麗に反映され、構造的に弱いパターン不良が生じなかったため、リリース後の破断も確認されなかった。ただし、スリット幅が極端に狭くなる現象により、梁同士のスティックが生じた可能性がある。これについては、RIE 工程による Au 層の広がりを見直し設計したうえで、RIE エッチング時間を適切に設定するなどの改善が必要になると考えられる。

Au 膜厚については、先に述べたように、これまでの試作と比較すると厚い状態が維持できた。しかしながら、Fig. 5.42(b) より、Cr マスクが消失していることと、ガラス基板を大きくエッチングしてしまっていることが確認されたため、ややオーバーエッチングであったことがわかった。エッチング条件を見直すことで、より厚膜の状態を維持できる可能性がある。

5.8 電熱駆動方式の考察

本研究では、電熱駆動方式 BRM を実験的に実証するために、4 パターンの工程による試作を行った。以下に、それぞれの特徴と、実験的実証の結果をまとめた。

Table 5.13: 電熱駆動方式 BRM の実験的検証のまとめ

工程	最大の位相差変化量 (波長)	特徴
I	-3.3°(37.4° ~ 34.1°) 0.656 μm	リリースで非駆動梁が剥離
II	5.1°(62.0° ~ 67.1°) 0.745 μm	梁の剥離がやや改善。Au 膜厚を厚くできる工程を実施。非駆動梁が短絡。
III	4.4°(5.8° ~ 10.2°) 0.5 μm 6.6°(8.7° ~ 15.3°) 0.6 μm	梁の剥離問題を解決。マスクの脆弱性で Au 膜厚を維持できず。
IV	-7.6°(86.2° ~ 78.6°) 0.532 μm	強耐性マスクで Au 膜厚を維持。

電熱駆動 BRM の試作の全体に言えることとして、静電駆動方式と比較して、位相差変化量が小さいという結果となった。主な要因として、より大きな位相差変化を得るために印加電圧を増加させ、素子を焼損させてしまうという結果が多かったことが挙げられる。これより、電熱駆動方式の重要な特性が明らかとなった。

例えば材料物性や構造の影響により剛性が想定より強くなった、あるいは膜に引張り応力が残留していた場合、バネの復元力の項が大きくなる。復元力は梁の駆動を抑える方向の力なので、同じ入力でも実際に得られる変形量は小さくなる。静電駆動方式の場合

合、変形量が想定より小さかった場合は、電圧を上げることによってある程度対処することができる。対して、電熱駆動方式の場合、変形量を増加させるということは熱膨張量を増やすということであり、より温度を上げる必要がある。サブミクロンスケールの構造の耐熱性はバルクの状態よりも低下している可能性がある⁷。

今回、電熱駆動方式の試作において、リリース後の座屈が課題となった。これを解決するために、経験的に引張りの残留応力が残る Au 層の膜厚を厚くするような改善を行い、座屈のない梁構造を製作することができた。座屈しなかったということは、膜内の残留応力が相殺されたか、引張りの残留応力が残っているかのいずれかである。後者の場合、前述のように梁の復元力の項が大きくなっていると考えられるため、同じ変位量を得るためには、より駆動力を要する。変形量を多くしようと印加電圧を上げることで、想定よりも早い破損や焼損を招くことになる。本研究で提案した電熱駆動方式 BRM は、梁構造に残留する引張応力の予測ができず、印加電圧の許容値を設定することができなかった。結果として、試作を焼損させることが多かった。

5.8.1 数値計算結果と測定結果の比較及び解析条件の考察

本研究では、理論的な解析が困難なグレーティング構造の光学特性を見積もるために、市販の電磁場解析ソフトを用いた数値計算を利用した。電熱駆動方式では、工程 IV(保護膜パターンニング型)の設計寸法での数値計算において、入射光波長 0.532 μm で最大 285° から最小 15° までの位相差変化が得られるという結果を得た (Fig. 5.39)。対して、測定結果は、波長 0.532 μm で 86.2° ~ 78.6° の位相差変化であった。この、電磁場解析の結果と測定結果との差は、計算モデルと実際の素子との形状の乖離の影響が大きいと考えられる。まず、工程 IV の試作のグレーティングの形状は、断面が三角形状になっていることが Fig. 5.42 の SEM 観察像から確認された。これにより、実効的なスリット幅が想定よりも広がっていた可能性がある。その場合、Au ナノグレーティングの特性より、初期位相差が計算結果よりも小さくなると推測される。加えて、Au 層の実効的な厚みについても、三角形状になっていることから、想定よりも薄くなっている可能性があり、これについても初期位相差が計算結果よりも小さくなる要因となる。

また、本研究では、数値計算のモデル内にガラス基板を配置しなかった。計算モデル作成時は、グレーティングと基板の距離が十分に離れていれば、基板との相互作用はないと想定していたが、試作において、犠牲層厚さを入射光波長よりも小さい 0.2 μm に設定した。このことから、実際の測定結果には、提案する電熱駆動型 BRM の特性に加

⁷ この要因には、成膜時の原子の堆積状態や、欠陥の影響が相対的に大きくなる、サイズ効果などが挙げられる。

えて、グレーティング層と基板間での作用が含まれている可能性がある。数値計算をより実現象に近づけるためには、ガラス基板モデルを配置する必要があると考えられる。

以上の2点について検証するために、より実際の構造に近い計算モデルを作成して数値計算を行った。グレーティング断面のモデル形状および寸法を Table 5.14 のように修正した。グレーティングモデルの寸法は、Fig. 5.42(b) に示した SEM 観察像から見積もった寸法を採用した。グレーティングとガラス基板とのギャップは、Si 犠牲層の設計寸法に設定した。

ガラス基板を追加したモデル及び追加していないモデルそれぞれの計算結果を Fig. 5.44 に示す。理想的な形状のモデルによる計算結果 (Fig. 5.39) と比較して、初期位相差の絶対値が全体的に低下した。この傾向は、推測と一致した。また、変形に対する位相差の変化量も大きく減少した。加えて、モデル内にガラス基板を配置することで、位相差の計算結果が全体的に低下する傾向があることが明らかとなった。ガラス基板は等方性の材料を想定してモデルを作成しているため、基板を透過する際は位相差への影響はないと考えられるので、基板界面とグレーティングとの相互作用が生じていると推測される。

また、本研究では、2次元モデルによる計算のみを実施したが、BRM は両端固定梁の変形を利用するコンセプトのため、グレーティングのスリットに平行な方向は、梁の中央から離れるほど変位が小さくなる特徴がある。したがって、スリットに平行な方向の形状の影響を考慮すると、実際の測定値は、計算結果よりさらに小さくなると推測される。これについて検証するには、3次元のモデルを作成して計算を行う必要がある。

以上の結果より、工程 IV の試作において、初期位相差が数値計算の見積もりよりも小さくなった要因には、グレーティング形状による影響が含まれている可能性があることが明らかとなった。この結果より、ガラス基板とグレーティングとの作用についても、さらなる検証が必要であることが示唆される。

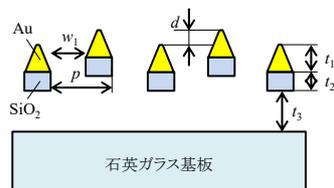
5.8.2 バイモルフ駆動に関する考察

機械的変形手法としての妥当性

本研究では、面外駆動によってより大きな位相差変化を得ることを目標とした。リリース時に座屈が発生すると、弾性領域内で得られる変形量が減少してしまうため、構造リリース直後の初期変形量は、できるだけ小さい方が望ましい。リリース後の形状が理想的に平坦にできた場合、面外駆動の方向は、よりやわらかく伸びやすい Au 側に変形を誘導できるため、バイモルフ構造は適した設計と言える。しかし、本節の工程ごとの比較の考察で述べたように、リリース後の状態が平坦だとしても、引張の残留応力が

Table 5.14: 実際の形状に近づけた電磁場解析の諸条件

パラメータ	設定値
グレーティング周期 p	$0.7 \mu\text{m}$
スリット幅 w	$0.1 \mu\text{m}$
Au 厚さ t_1	$0.24 \mu\text{m}$
SiO ₂ 厚さ t_2	$0.2 \mu\text{m}$
ギャップ t_3	$0.2 \mu\text{m}$
セルサイズ $\Delta x (= \Delta z)$	$0.02 \mu\text{m}$
時間ステップ Δt	$0.0057/c$ $= 1.9 \times 10^{-17}$ ただし c は光速



生じている可能性があることが示唆された。線膨張率の低い SiO₂ 層を含むバイモルフ構造は、Au 単層と比較すると変形しにくいと考えられるため、残留応力の制御を適切に行わなければ、想定以上の駆動力を要することになる。静電駆動方式のように、Au 単層の駆動梁に面外駆動を発生させることができれば、変形に必要な駆動力が小さくなり、大きな変形量を得られる可能性がある。Au 単層の電熱駆動を想定した場合、変形方向を上向きに制御するには、リリース直後にわざと上向きに座屈させる等、上方向に曲がりやすい状況を意図的に作り出す必要がある。例えば、エッチング工程を工夫して梁の断面形状を上下非対称にするなど、何らかの工夫によって実現できる可能性がある。これらの仮説は、有限要素法等による材料変形の数値解析と、製作時に生じる残留応力の制御手法の確立によって、検証することができると考えられる。

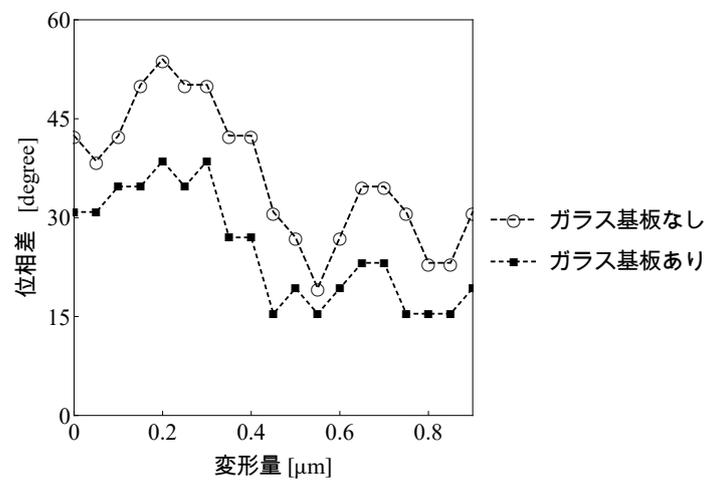


Figure 5.44: 実際の形状に近づけた計算モデルでの電磁場解析の計算結果. 入射光波長は $0.532 \mu\text{m}$.

バイモルフ層の光学的な影響の考察

電磁場解析による数値計算の結果から、バイモルフ構造のグレーティングでは、変形量に対する位相差の変化が単調減少ではない可能性があることが明らかとなった。これについてさらに検証を行うために、電磁場解析モデルを一部修正して数値計算を行った。数値解析の諸条件を Table 5.15 に、計算に使用した 2 次元断面モデルの概略図及び計算中の様子を Fig. 5.45 に示す。まず、Au 層を試作設計時よりも大きな $0.6 \mu\text{m}$ に変更した。また、バイモルフ下層を Si に変更した Au/Si バイモルフ構造のモデルを別途作成し、計算を行った。計算結果を Fig. 5.46 にまとめた。この結果より、単に Au 層を厚くすることで、変位に対する位相差変化の傾向が単調減少になる可能性があることが明らかとなった。これは、バイモルフ下層よりも Au 層の特性が支配的になったことが要因と考えられる。また、下層を Si に変更することで、初期位相差が SiO_2 と比較して増加し、位相差減少量の傾きもより大きくなる可能性があることがわかった。これより、バイモルフ構造のグレーティングを用いた BRM においては、各層の厚み、及び下層の材料の選択が光学特性に与える影響について、より詳しく検証する必要があることが明らかとなった。この結果を元に試作を行う場合、例えば Si を構造として利用する場合は、犠牲層をレジストにするなどの工夫によって、本研究で考案した製作工程を利用することができる。

Table 5.15: 電磁場解析の諸条件

パラメータ	設定値
グレーティング周期 p	$0.7 \mu\text{m}$
スリット幅 w	$0.25 \mu\text{m}$
Au 厚さ t_1	$0.6 \mu\text{m}$
Si(SiO_2) 厚さ t_2	$0.25 \mu\text{m}$
セルサイズ $\Delta x (= \Delta z)$	$0.01 \mu\text{m}$
時間ステップ Δt	$0.0057/c = 1.9 \times 10^{-17}$ ただし c は光速

5.8.3 静電駆動方式との比較

電熱駆動方式の試作において、リリース後に構造の破断や座屈が生じない工程を確立することに成功した。加えて、Au 膜厚を維持しつつ、スリット幅についても調整の余地がある製作工程を実証することができた。いずれも、Au ナノグレーティングの複屈折

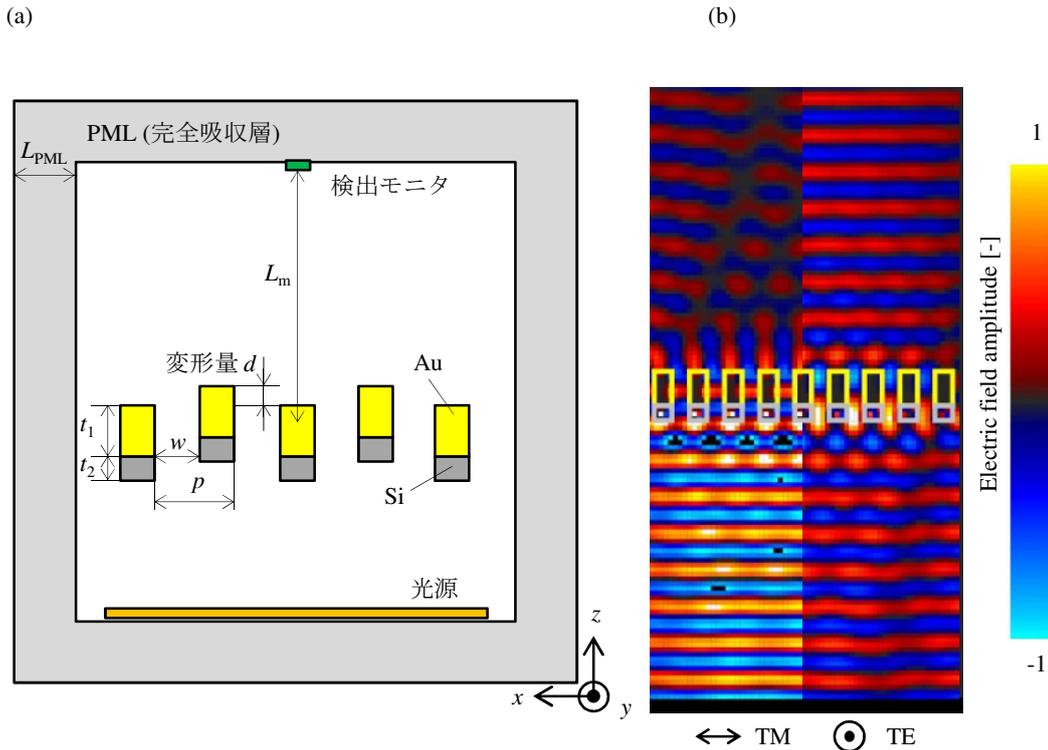


Figure 5.45: (a) 数值解析で使用了した2次元断面モデルの概略図。(b) 計算中の電磁場の様子 (構造の変形量 $d=0.35 \mu\text{m}$)。

量に起因するため、静電駆動方式と比較して、より大きな初期位相差が得られた。しかしながら、電熱駆動方式は、温度変化を利用する性質上、目標とする変化量に到達する前に焼損してしまい、光制御手法としては適さないのではないかという結論に至った。

以上のことから、電熱駆動方式 BRM の実証で得た製作工程の知見を、静電駆動方式 BRM に応用することで、位相差変化量を改善することができると考えられる。保護膜パターンニング型の電熱駆動方式 BRM の設計寸法で静電駆動方式 BRM を製作できた場合、波長 $0.633 \mu\text{m}$ で位相差変化量が $-183^\circ (253.4^\circ \sim 70.4^\circ)$ 程度得られると見積もることができる (Fig. 5.47)。これを実現するために改善すべき条件のひとつが、製作工程中のレジスト塗布工程である。重ね EB 描画工程で、既に製作されたグレーティング構造をレジストで覆う必要があったが、この条件によって、グレーティングのスリット幅を $0.5 \mu\text{m}$ 以下にすることができなかつた。例えばレジストの種類や希釈方法の変更、あるいは真空脱泡工程の追加などによって、より狭いスリット幅のグレーティングでもレジストによる被膜が可能になれば、所望の設計寸法で静電駆動方式 BRM を製作することができる。

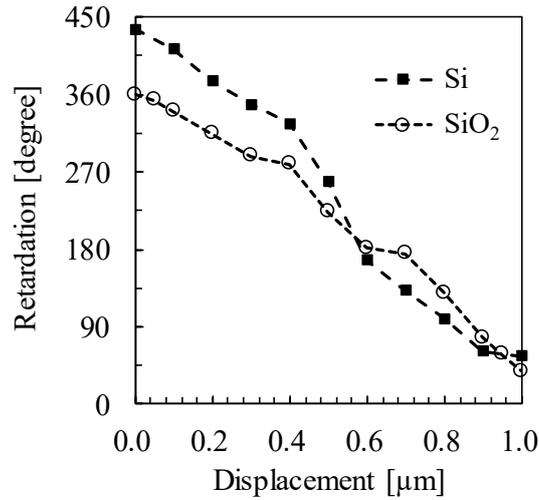


Figure 5.46: Au/Si バイモルフ構造の位相差変化の数値解析結果. 入射光波長は $0.633 \mu\text{m}$.

ただし、電熱駆動方式にも有利な点があり、例えば上部電極が不要なため、実際のデバイスでは静電方式よりも薄く作製できる等の特徴を有している。現状の電熱方式の欠点は耐熱性である。Au に近い光学特性を有する窒化チタンなどの耐熱性材料の利用を検討することで、破損しにくくなる可能性がある。このように、電熱方式についても改善の余地があり、さらなる検証を行う価値があると考えられる。

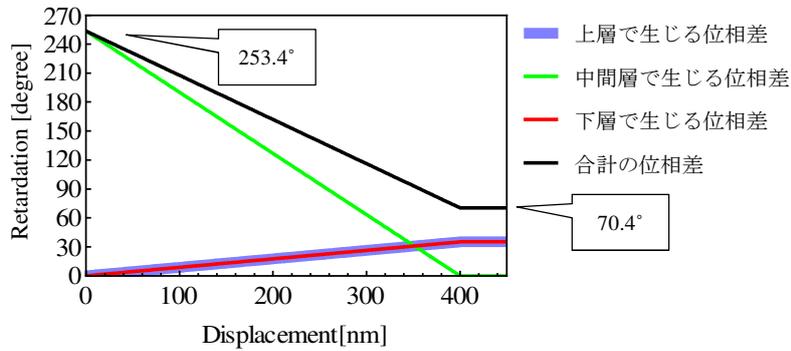


Figure 5.47: 3層のグレーティングで近似した場合の、変形量に対する位相差の変化. ただし、設計寸法は、保護膜パターニング型の電熱駆動方式 BRM の設計寸法と同様に、 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$, $w_1 = 0.24 \mu\text{m}$, $p = 0.5 \mu\text{m}$, $t = 0.4 \mu\text{m}$ とした。

5.9 提案する BRM についての総括

測定結果に含まれる誤差の考察

電熱駆動方式の製作 IV(保護膜パターンニング型)の位相差スペクトル (Fig. 5.43) について、標準偏差を追記したグラフを改めて Fig. 5.48 に示した。なお、グラフの重なりを考慮し、印加なし (0 V) 及び測定中最大の印加電圧 (2.9 V) の測定データのみを抜き出して示した。本測定では、1 サイクルの測定の間、検光子角度毎の透過光強度の測定を行っている。例えばこの測定では、検光子角度 15° 毎に $0^\circ \sim 180^\circ$ までの透過光強度を取得している。したがって、ある印加電圧条件での位相差スペクトルを取得するまでに、13 回の分光測定を行った。そのため、測定サイクルを増やそうとすることにより測定回数が増加し、結果として測定中に試料が焼損してしまうことが多かった。また、測定中に測定スポットがずれる、あるいは電圧印加により素子が一部破損したり、加熱や応力によって薄膜の材料特性が変化したりする現象が生じている可能性があり、これについても、測定サイクルごとに位相差スペクトルがずれる要因となる。以上より、Fig. 5.48 で示した標準偏差は、2 回の測定サイクルで生じる誤差を表していると考えられる。現状よりさらに測定サイクルを増やした場合、試料自体の状態が変わる可能性があるため、標準偏差はより大きくなる可能性がある。測定誤差の影響を抑えるためには、試料の破損や材料特性の変化が生じない印加電圧条件で測定を行う必要がある。

現状の BRM の性能及び応用について

今回製作に成功した BRM を可変複屈折素子として応用することを考えた時、素子の大きさに変化量に課題が残った。素子の大きさについては、両持ち梁の湾曲を利用する設計上、変化量を大きくするためには、梁の長さは長い方が有利となる。そのため、スリットに平行な方向においては素子の大きさに制約がある。今回の試作では、静電駆動方式では $500 \mu\text{m}$ 、電熱駆動方式は、グレーティング部分だけで $20 \mu\text{m}$ を要した。また、位相差の変化量については、5.8.3 項で改善の可能性を提示したが、実現するまでにはさらなる試作及び検証が必要になることが推測される。

また、本研究では、試作の破損などの理由により、応答速度についての実験的な検証には至らなかった。4.1.4 項で解析的な見積もりを行ったが、現状の設計では、理想的な状態でも液晶と同程度の応答速度となることを見積られた。機械的な共振による制約は、機械的変形を利用する MEMS の特徴でもあり、欠点でもある。より薄く細くし、軽くてやわらかい材料を選定するなど、自立構造の形状や材料特性の見直しを行ったとしても、構造的に弱くなってしまい、より破損しやすくなる可能性がある。

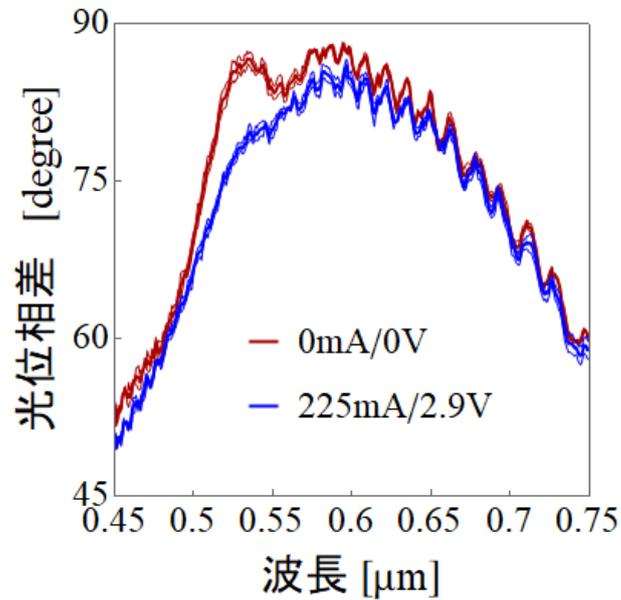


Figure 5.48: 標準偏差を追記した，電熱駆動方式の製作 IV(保護膜パターンニング型) の位相差スペクトル．ただし，印加なし (0 V) 及び測定中最大の印加電圧 (2.9 V) の測定データのみ記載．

以上のことから，例えば液晶ディスプレイ素子のような，素子サイズと応答速度の要求性能が高い用途を考えた場合，現状の設計では応用は難しいということが明らかとなった．

ただし，本研究の BRM は，液晶部分だけで数 μm の厚みが必要な液晶ディスプレイ素子よりも薄く作製できる見込みがある．また固体のみで構成されている点など，液晶素子にはない特徴を有するため，何らかの差別化をはかる余地は充分にあると考えられる．将来の光学デバイスの超小型・多機能化において，液晶素子では解決しえない課題が生じる可能性はないとは言い切れない．本研究で提案する BRM のさらなる検証と改善は，そのような未知の課題の解決につながることも期待できる．

5.10 本章のまとめ

電熱駆動方式の面外駆動型 BRM の設計及び製作工程を考案し、試作を行った。4 パターンの製作工程による試作を行い、リリース後に構造の破断や座屈が生じない工程を確立することに成功した。確立した製作工程によって試作した BRM において、印加電圧を 0 ~ 2.9 V まで変化させたところ、波長 0.532 μm で、 -7.6° ($86.2^\circ \sim 78.6^\circ$) の位相差変化が生じた。また、波長 0.5 μm ~ 0.8 μm の範囲で、静電駆動方式を含む試作の中で最も大きな初期位相差を生じた。この要因は、スリット幅と、Au 層の厚みを維持したまま自立構造の製作に成功したことが挙げられる。

以上の結果により、電熱駆動方式 BRM の試作によっても、Au ナノグレーティングによる複屈折可変メタサーフェスの実証に成功した。

電熱駆動方式の面外駆動型 BRM の課題は、次の 3 つである。

- 変位の増加に対する位相差変化の傾向が、単調ではない。
- 実証した複屈折位相差変化量は最大 -7.6° であった。
- 変化量を大きく稼ぐためには温度を上昇させる必要があるため、破損に繋がりやすい。

一点目は、バイモルフグレーティングの下層材料が及ぼす光学特性への影響を、詳細に検証する必要があると考えられる。二、三点目は、電熱駆動方式の特性に直結しているため、現状の駆動方式のままでは改善することは難しい。構造的に弱い Au 梁そのものを加熱するのではなく、静電駆動方式のような自立 Au 膜に、耐熱性の高い金属膜を網目状にパターニングするなどして、加熱用の抵抗体を別途設ける等の工夫が必要になると考えられる [72]。

第6章

結論

本論文では、可視光域の重要な光制御技術の1つである可変複屈折を、機械的変形メタサーフェスで実証することを試みた。複屈折特性を有するメタサーフェスの一種である「Au ナノグレーティング」に着目し、これに、大きな変化量を得るのに有効なアプローチである「面外変形」を適用することで、複屈折可変メタサーフェスが実現できると考えた。提案する複屈折可変メタサーフェス (BRM) の理論及び数値解析による検証と、試作による実験的な検証を行った。

まず、Au ナノグレーティングを構成する Au 梁を面外方向に駆動させて、複屈折を動的に変化させる手法を考案した。本手法は、Au ナノグレーティングを構成する Au 梁構造に対して、一本おきに面外駆動特性を付与することにより、グレーティングの実効的な厚さを動的に制御することで、複屈折を制御することができる。

考案した手法の妥当性を確認するため、面外変形中の Au グレーティング断面を3層の Au グレーティングに近似する手法を考案し、複屈折変化の理論的な解析を行った。解析により、代表的な波長 $0.46\ \mu\text{m}$, $0.53\ \mu\text{m}$, $0.63\ \mu\text{m}$ において、 180° に近い位相差の変化が得られることを示した。この結果により、本研究で提案する BRM は、一例として、ディスプレイ素子等で用いられる光強度制御への応用に必要な複屈折変化量が実現できる可能性があることを確認した。

続いて、提案する BRM を実証するために、静電引力で引張り上げる「静電駆動方式」と、熱膨張を利用する「電熱駆動方式」の2種類の面外駆動の手法を考案した。いずれも MEMS の駆動手法として利用される原理に基づいており、外部からの電圧電流印加によって変形量を制御することが可能なため、提案する BRM に適していると考えた。

まず、静電駆動方式の面外駆動型 BRM の設計及び製作工程を考案し、試作を行った。試作した素子に $0\sim 700\ \text{V}$ の電圧を印加したところ、 $0\sim 200\ \text{V}$ の範囲において、波長 $0.633\ \mu\text{m}$ で、位相差変化量 $25.3^\circ (21.5^\circ \sim 46.8^\circ)$ を達成した。また、二次試作素子を利

用した初期変形量と位相差の調査により、面外駆動に変位によって位相差が変化することを実験的に確認することができた。これらの結果により、面外駆動型 Au ナノグレーティングによる複屈折可変メタサーフェスの実証に成功した。

次に、電熱駆動方式の面外駆動型 BRM の設計及び製作工程を考案し、試作を行った。4 パターンの製作工程による試作を行い、リリース後に構造の破断や座屈が生じない工程を確立することに成功した。確立した製作工程によって試作した BRM において、印加電圧を 0 ~ 2.9 V まで変化させたところ、波長 0.532 μm で、 -7.6° ($86.2^\circ \sim 78.6^\circ$) の位相差変化が生じた。また、波長 0.5 μm ~ 0.8 μm の範囲で、静電駆動方式を含む試作の中で最も大きな初期位相差を生じた。これらの結果により、電熱駆動方式 BRM の試作によっても、Au ナノグレーティングによる複屈折可変メタサーフェスの実証に成功した。

以上より、本研究で提案する面外駆動型 BRM において、次の 2 点を世界で初めて実証した。

- 可視光領域で複屈折位相差 $0^\circ \sim 180^\circ$ の変化が実証できる可能性があることを、理論解析によって示した。
- 面外駆動型の機械的変形メタサーフェスによって、可視光の複屈折変化を実証した。静電駆動方式の面外駆動型 BRM において、波長 0.633 μm で位相差変化 25.3° ($21.5^\circ \sim 46.8^\circ$) を達成した。また、電熱駆動方式の面外駆動型 BRM において、波長 0.532 μm で位相差変化 -7.6° ($86.2^\circ \sim 78.6^\circ$) を達成した。

また、複数のアプローチによる実験的実証により、提案する BRM の課題と改善点が明らかとなった。まず、静電駆動方式 BRM に関して、Au ナノグレーティングの厚さを維持できない点と、スリット幅を狭くすることができないという点で、主に製作工程に課題が残った。いずれも、Au ナノグレーティングの複屈折量に起因するため、実証した初期位相差の最大値が 46.8° と小さくなったこと的主要因素である。一方で、電熱駆動方式 BRM では、Au 膜厚を維持しつつ、スリット幅についても調整の余地がある製作工程を実証することができた。しかしながら、電熱駆動方式 BRM は、温度変化を利用する性質上、目標とする変化量に到達する前に焼損してしまい、制御手法としては適さないことが明らかとなった。以上のことから、電熱駆動方式 BRM の実証で得た製作工程の知見を、静電駆動方式 BRM に応用することで、位相差変化量をより大きくすることができる。電熱駆動方式 BRM の設計寸法で静電駆動方式 BRM を製作できた場合、波長 0.633 μm で位相差変化量が -183° ($253.4^\circ \sim 70.4^\circ$) 程度得られると見積もることができる。

面外駆動型 BRM によってより大きな複屈折可変特性が得られれば，対象波長可変の広帯域波長板，マイクロサイズのレーザ制御素子，非侵襲デバイスへの組込など，将来の超小型で多機能な光学デバイスへの貢献に繋がることが期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始懇切なるご指導・ご鞭撻を賜りました東京農工大学大学院工学研究院の岩見健太郎准教授に心より感謝いたしますと共に、厚く御礼申し上げます。また、ご多忙ながら的確なご指導・ご鞭撻を賜りました本学大学院工学研究院の梅田倫弘教授に心より感謝致します。

本論文の副査をご担当くださいました東京農工大学大学院工学研究院の安藤泰久教授、久保若奈准教授、清水大雅准教授、花崎逸雄准教授、東北大学大学院工学研究科の金森義明准教授に深く御礼申し上げます。

輪講等で様々な視点からの的確なご指導を賜りました、本学技術専門職員の高柳淳夫氏、梅田研究室前特任助教の長崎秀昭氏、田口敦清氏、岩見研究室前特任助教の安忠烈氏に深く感謝致します。特に、長崎氏には、予備実験として実施した電熱駆動方式 BRM による透過率制御を成果として論文にまとめるにあたり、重要なお助言をいただきました。

素子の製作にあたり、電子ビーム描画をはじめとする各種装置利用に関する数々のご指導とトラブル対応等でご助力いただきました、ナノテクノロジープラットフォーム東京大学拠点大規模集積システム設計教育研究センター (VDEC) の三田吉郎准教授、技術職員の澤村智紀氏をはじめとする職員・技術補佐員の方々、東京大学三田研究室の岡本有貴氏、同研究室 OB の坂本直之氏に深く感謝致します。

研究活動や各種イベントに共に取り組んだ梅田研究室 OB・OG、そして、実験装置の利用や博士課程の研究活動において数々の助言をいただきました、岩見・梅田研究室 OB の李永波氏、金指康明氏、浅香孝氏に心より感謝いたします。

Au ナノグレーティング及び Au ナノフィンに関する課題に共に取り組んだ、岩見研究室 OB・OG の石井美帆氏、木下卓哉氏、岩見研究室の白木丈博氏、宮本伸吾氏、湖東裕士氏、城光寺佑樹氏に深く感謝致します。特に、木下氏、湖東氏には、静電駆動方式 BRM の設計、製作及び光学測定において最も重要な役割を担っていただきました。また、石井氏には、先輩としても研究者としても常に的確なアドバイスをいただきました。

研究活動の苦楽を共にしてきた、岩見研究室創設以来のすべての学生、研究生に深く感謝致します。

学部の4年間,共に技術を高め合い,研究室配属後も様々な活動を共に行った,ロボット研究会 R.U.R 第18代メンバーに感謝致します.

最後に,9年間にわたる大学生活と,修士・博士への進学を最後まで応援していただき,また援助いただいた両親に心より感謝致します.

本研究は,日本学術振興会特別研究員(DC1)として,JSPS 科研費 16J08512 の助成を受けて行われました.

参考文献

- [1] シグマ光機株式会社. フォーカスチューナブルレンズ製品情報. [https://www.global-optosigma.com/jp/Catalogs/pno/?from=page&pname=EL-10-30&ccode=W3202&dcode=.](https://www.global-optosigma.com/jp/Catalogs/pno/?from=page&pname=EL-10-30&ccode=W3202&dcode=)
- [2] 浜松ホトニクス-関連情報 (光半導体製品). 「光半導体素子ハンドブック 第12章」. https://www.hamamatsu.com/sp/ssd/doc_ja.html.
- [3] Silicon Light Machines. テクノロジー, glv テクノロジー. <http://www.siliconlight.com/ja/technology/glv.html>.
- [4] Texas Instruments-The TI DLP Blog. The pioneering work that led to the dmd. http://e2e.ti.com/blogs_/b/enlightened/archive/2016/10/06/the-pioneering-work-that-led-to-the-dmd.
- [5] Nanfang Yu and Federico Capasso. Flat optics with designer metasurfaces. *Nature Materials*, Vol. 13, No. 2, pp. 139–150, 2014.
- [6] Stefan Linden, Christian Enkrich, Martin Wegener, Jiangfeng Zhou, Thomas Koschny, and Costas M. Soukoulis. Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz. *Science*, Vol. 306, No. 5700, pp. 1351–1353, 2004.
- [7] Vladimir M Shalaev, Wenshan Cai, Uday K Chettiar, Hsiao-kuan Yuan, Andrey K Sarychev, Vladimir P Drachev, and Alexander V Kildishev. Negative index of refraction in optical metamaterials. *OPTICS LETTERS*, Vol. 30, No. 24, pp. 3356–3358, 2005.
- [8] 岡本隆之, 梶川浩太郎. プラズモニクス-基礎と応用. 講談社, 2010.
- [9] Stanislav B. Glybovski, Sergei A. Tretyakov, Pavel A. Belov, Yuri S. Kivshar, and Constantin R. Simovski. Metasurfaces: From microwaves to visible. *Physics Reports*, Vol. 634, pp. 1–72, 2016.

- [10] Yoshiaki Kanamori, Masaya Shimono, and Kazuhiro Hane. Fabrication of transmission color filters using silicon subwavelength gratings on quartz substrates. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, No. 20, pp. 2126–2128, 2006.
- [11] Yoshiaki Kanamori, Toshikazu Ozaki, and Kazuhiro Hane. Fabrication of ultrathin color filters for three primary colors using guided-mode resonance in silicon subwavelength gratings. *Optical Review*, Vol. 21, No. 5, pp. 723–727, 2014.
- [12] Lingling Huang, Xianzhong Chen, Holger Mühlenbernd, Hao Zhang, Shumei Chen, Benfeng Bai, Qiaofeng Tan, Guofan Jin, Kok Wai Cheah, Cheng Wei Qiu, Jensen Li, Thomas Zentgraf, and Shuang Zhang. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface. *Nature Communications*, Vol. 4, No. May, p. 2808, 2013.
- [13] Dandan Wen, Fuyong Yue, Guixin Li, Guoxing Zheng, Kinlong Chan, Shumei Chen, Ming Chen, King Fai Li, Polis Wing Han Wong, Kok Wai Cheah, Edwin Yue Bun Pun, Shuang Zhang, and Xianzhong Chen. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms. *Nature Communications*, Vol. 6, No. May, p. 8241, 2015.
- [14] Xiong Li, Lianwei Chen, Yang Li, Xiaohu Zhang, Mingbo Pu, Zeyu Zhao, Xiaoliang Ma, Yanqin Wang, Minghui Hong, and Xiangang Luo. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation. *Science Advances*, Vol. 2, No. e1601102, pp. 1–6, 2016.
- [15] Christopher Gladden, Majid Gharghi, Thomas Zentgraf, Yongmin Liu, Xiaobo Yin, Jason Valentine, and Xiang Zhang. A Carpet Cloak Device for Visible Light. *Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII*, 2011.
- [16] Xingjie Ni, Zi Jing Wong, Michael Mrejen, Yuan Wang, and Xiang Zhang. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light. *Science*, Vol. 349, No. 6254, pp. 1310–1314, 2015.
- [17] Nikolay I. Zheludev and Yuri S. Kivshar. From metamaterials to metadevices. *Nature Materials*, Vol. 11, No. 11, pp. 917–924, 2012.

-
- [18] Meng Xin Ren, Wei Wu, Wei Cai, Biao Pi, Xin Zheng Zhang, and Jing Jun Xu. Reconfigurable metasurfaces that enable light polarization control by light. *Light: Science and Applications*, Vol. 6, No. 6, pp. e16254–5, 2017.
- [19] Dacheng Wang, Lingchao Zhang, Yinghong Gu, M. Q. Mehmood, Yandong Gong, Amar Srivastava, Linke Jian, T. Venkatesan, Cheng Wei Qiu, and Minghui Hong. Switchable Ultrathin Quarter-wave Plate in Terahertz Using Active Phase-change Metasurface. *Scientific Reports*, Vol. 5, p. 15020, 2015.
- [20] Jura Rensberg, Shuyan Zhang, You Zhou, Alexander S. McLeod, Christian Schwarz, Michael Goldflam, Mengkun Liu, Jochen Kerbusch, Ronny Nawrodt, Shriram Ramanathan, D. N. Basov, Federico Capasso, Carsten Ronning, and Mikhail A. Kats. Active Optical Metasurfaces Based on Defect-Engineered Phase-Transition Materials. *Nano Letters*, Vol. 16, No. 2, pp. 1050–1055, 2016.
- [21] Guoping Wang, Xuechen Chen, Sheng Liu, Chingping Wong, and Sheng Chu. Mechanical Chameleon through Dynamic Real-Time Plasmonic Tuning. *ACS Nano*, Vol. 10, No. 2, pp. 1788–1794, 2016.
- [22] Yao Wei Huang, Ho Wai Howard Lee, Ruzan Sokhoyan, Ragip A. Pala, Krishnan Thyagarajan, Seunghoon Han, Din Ping Tsai, and Harry A. Atwater. Gate-Tunable Conducting Oxide Metasurfaces. *Nano Letters*, Vol. 16, No. 9, pp. 5319–5325, 2016.
- [23] Jongbum Kim, Sajid Choudhury, Clayton DeVault, Yang Zhao, Alexander V. Kildishev, Vladimir M. Shalaev, Andrea Alù, and Alexandra Boltasseva. Controlling the Polarization State of Light with Plasmonic Metal Oxide Metasurface. *ACS Nano*, Vol. 10, No. 10, pp. 9326–9333, 2016.
- [24] Daniel Franklin, Russell Frank, Shin-Tson Wu, and Debashis Chanda. Actively addressed single pixel full-colour plasmonic display. *Nature Communications*, Vol. 8, No. May, p. 15209, 2017.
- [25] Yoshiaki Kanamori, Ryohei Hokari, and Kazuhiro Hane. MEMS for plasmon control of optical metamaterials. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 21, No. 4, 2015.
-

- [26] Imogen M. Pryce, Koray Aydin, Yousif A. Kelaita, Ryan M. Briggs, and Harry A. Atwater. Highly strained compliant optical metamaterials with large frequency tunability. *Nano Letters*, Vol. 10, No. 10, pp. 4222–4227, 2010.
- [27] Xin Liu, Zhao Huang, Chengkai Zhu, Li Wang, and Jianfeng Zang. Out-of-Plane Designed Soft Metasurface for Tunable Surface Plasmon Polariton. *Nano Letters*, 2018.
- [28] Ji-eun Lee, Choojin Park, Kyungwha Chung, Ju Won Lim, Filipe Marques Mota, Unyong Jeong, and Dong Ha Kim. Viable stretchable plasmonics based on uni-directional nanoprisms. *Nanoscale*, pp. 4105–4112, 2018.
- [29] Yoshiaki Kanamori, Naoki Matsuyama, and Kazuhiro Hane. Resonant-wavelength tuning of a pitch-variable 1-D photonic crystal filter at telecom frequencies. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 20, No. 13, pp. 1136–1138, 2008.
- [30] J. Y. Ou, E. Plum, L. Jiang, and N. I. Zheludev. Reconfigurable photonic metamaterials. *Nano Letters*, Vol. 11, No. 5, pp. 2142–2144, 2011.
- [31] Jun Yu Ou, Eric Plum, Jianfa Zhang, and Nikolay I. Zheludev. An electromechanically reconfigurable plasmonic metamaterial operating in the near-infrared. *Nature Nanotechnology*, Vol. 8, pp. 252–255, 2013.
- [32] João Valente, Jun Yu Ou, Eric Plum, Ian J. Youngs, and Nikolay I. Zheludev. Reconfiguring photonic metamaterials with currents and magnetic fields. *Applied Physics Letters*, Vol. 106, No. 11, p. 111905, 2015.
- [33] Oleksandr Buchnev, Nina Podoliak, Thomas Frank, Malgosia Kaczmarek, Liudi Jiang, and Vassili A. Fedotov. Controlling Stiction in Nano-Electro-Mechanical Systems Using Liquid Crystals. *ACS Nano*, Vol. 10, No. 12, pp. 11519–11524, 2016.
- [34] T. Shimura, K. Iwami, and N. Umeda. Transmission modulation of micro retarder using out-of-plane thermally-driven Au nanograting. *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, Vol. 137, No. 11, pp. 400–406, 2017.
- [35] Tetsuo Kan, Akihiro Isozaki, Natsuki Kanda, Natsuki Nemoto, Kuniaki Konishi, Makoto Kuwata-Gonokami, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama. Spiral

-
- metamaterial for active tuning of optical activity. *Applied Physics Letters*, Vol. 102, No. 22, 2013.
- [36] Tetsuo Kan, Akihiro Isozaki, Natsuki Kanda, Natsuki Nemoto, Kuniaki Konishi, Hidetoshi Takahashi, Makoto Kuwata-Gonokami, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama. Enantiomeric switching of chiral metamaterial for terahertz polarization modulation employing vertically deformable MEMS spirals. *Nature Communications*, Vol. 6, p. 8422, 2015.
- [37] Hiroaki Honma, Kazuhiro Takahashi, Hiromu Ishii, Makoto Ishida, and Kazuaki Sawada. A 3 . 3 V operated variable transmission attenuator based on subwavelength grating. *Optical MEMS and Nanophotonics 2013*, Vol. 20, No. August, pp. 107–108, 2013.
- [38] Kenzo Yamaguchi, Masamitsu Fujii, Toshihiro Okamoto, and Masanobu Haraguchi. Electrically driven plasmon chip: Active plasmon filter. *Applied Physics Express*, Vol. 7, No. 1, p. 012201, 2014.
- [39] Hiroaki Honma, Kazuhiro Takahashi, Makoto Ishida, and Kazuaki Sawada. Continuous control of surface-plasmon excitation wavelengths using nanomechanically stretched subwavelength grating. *Applied Physics Express*, Vol. 9, No. 2, p. 027201, 2016.
- [40] H. Honma, M. Mitsudome, M. Ishida, K. Sawada, and K. Takahashi. Nanoptomechanical characterization of surface-plasmon-based tunable filter integrated with comb-drive actuator. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 27, No. 3, p. 034001, 2017.
- [41] Kenzo Yamaguchi, Hiroki Yamanaka, Tomoya Ohtsu, and Satoshi Ishii. Electrically driven plasmon chip: Active plasmon lens in the visible range. *Applied Physics Letters*, Vol. 108, No. 11, p. 111903, 2016.
- [42] Sawasdivorn Chernroj, Hisayuki Onuma, Tomohiro Suzuki, Takashi Sasaki, Hiroshi Matsuura, and Kazuhiro Hane. Fabrication and evaluation of single-crystal-silicon tunable grating using polymer-based membrane transfer bonding process. *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, Vol. 135, No. 9, pp. 361–366, 2015.
-

- [43] Brian S. Dennis, David A. Czaplewski, Michael I. Haftel, Daniel Lopez, Girsh Blumberg, and Vladimir Aksyuk. Diffraction limited focusing and routing of gap plasmons by a metal-dielectric-metal lens. *Optics Express*, Vol. 23, No. 17, p. 21899, 2015.
- [44] Pablo Cencillo-Abad, Eric Plum, Edward T F Rogers, and Nikolay I Zheludev. Spatial optical phase-modulating metadvice with subwavelength pixelation. *Opt. Express*, Vol. 24, No. 16, pp. 18790–18798, 2016.
- [45] B. S. Dennis, M. I. Haftel, D. A. Czaplewski, D. Lopez, G. Blumberg, and V. A. Aksyuk. Compact nanomechanical plasmonic phase modulators. *Nature Photonics*, Vol. 9, No. 4, pp. 267–273, 2015.
- [46] Xiaoguang Zhao, Jacob Schalch, Jingdi Zhang, Huseyin R. Seren, Guangwu Duan, Richard D. Averitt, and Xin Zhang. Electromechanically tunable metasurface transmission waveplate at terahertz frequencies. *Optica*, Vol. 5, No. 3, p. 303, 2018.
- [47] Nikolay I. Zheludev and Eric Plum. Reconfigurable nanomechanical photonic metamaterials. *Nature Nanotechnology*, Vol. 11, pp. 16–22, 2016.
- [48] 竹添秀男, 宮地弘一. 化学の要点シリーズ 19 液晶-基礎から最新の科学とディスプレイテクノロジーまで-. 共立出版, 2017.
- [49] Kenichi Aoshima, Kenji Machida, Daisuke Kato, Tomoyuki Mishina, Kakeru Wada, Yong Fu Cai, Hidekazu Kinjo, Kiyoshi Kuga, Hiroshi Kikuchi, Takayuki Ishibashi, and Naoki Shimidzu. A magneto-optical spatial light modulator driven by spin transfer switching for 3D holography applications. *IEEE/OSA Journal of Display Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 129–135, 2015.
- [50] Naoya Tate, Tadashi Kawazoe, Wataru Nomura, and Motoichi Ohtsu. Current-induced giant polarization rotation using a ZnO single crystal doped with nitrogen ions. *Scientific Reports*, Vol. 5, pp. 1–7, 2015.
- [51] Kentaro Iwami, Miho Ishii, Yuzuru Kuramochi, Kenichi Ida, and Norihiro Umeda. Ultrasmall radial polarizer array based on patterned plasmonic nanoslits. *Applied Physics Letters*, Vol. 101, No. 16, p. 161119, 2012.

-
- [52] Shen-Yu Hsu, Kuang-IL Lee, En-Hong Lin, Ming-Chang Lee, and Pei-Kuen Wei. Giant birefringence induced by plasmonic nanowire arrays. *Applied Physics Letters*, Vol. 95, p. 013105, 2009.
- [53] Patrice Genevet, Nanfang Yu, Francesco Aieta, Jiao Lin, Mikhail A. Kats, Romain Blanchard, Marlan O. Scully, Zeno Gaburro, and Federico Capasso. Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities. *Applied Physics Letters*, Vol. 100, No. 1, pp. 1–4, 2012.
- [54] Y. Zhao and A. Alu. Tailoring the dispersion of plasmonic nanorods to realize broadband optical meta-waveplates. *NANO LETTERS*, Vol. 3, No. 13, p. 1086–1091, 2013.
- [55] Dianmin Lin, Pengyu Fan, Erez Hasman, and Mark L. Brongersma. Dielectric gradient metasurface optical elements. *Science*, Vol. 345, No. 6194, pp. 298–302, 2014.
- [56] Miho Ishii, Kentaro Iwami, and Norihiro Umeda. An Au nanofin array for high efficiency plasmonic optical retarders at visible wavelengths. *Applied Physics Letters*, Vol. 106, No. 2, p. 021115, 2015.
- [57] Miho Ishii, Kentaro Iwami, and Norihiro Umeda. Highly-efficient and angle-independent zero-order half waveplate at broad visible wavelength based on Au nanofin array embedded in dielectric. *Optics Express*, Vol. 24, No. 8, p. 7966, 2016.
- [58] Max Born, Emil Wolf 著, 草川徹訳. 光学の原理Ⅲ. 東海大学出版会, 第7版, 2006.
- [59] Thorlabs グローバルサイト. 電気光学 (eo) 変調器製品情報, 仕様. https://www.thorlabs.co.jp/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=2729.
- [60] 木村宗弘. 講座：ディスプレイの基礎 [第1回] 液晶ディスプレイの基礎. 映像情報メディア学会誌, Vol. 67, No. 7, pp. 578–583, 2013.
- [61] 多田邦雄, 松本俊. 光・電磁物性. コロナ社, 2006.
- [62] 西原浩編著. 光・電磁波工学. オーム社, 2000.
- [63] Reuven Gordon and Alexandre G. Brolo. Increased cut-off wavelength for a sub-wavelength hole in a real metal. *Optics Express*, Vol. 13, No. 6, p. 1933, 2005.
-

- [64] Reuven Gordon. Light in a subwavelength slit in a metal: Propagation and reflection. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, Vol. 73, No. 15, pp. 8–10, 2006.
- [65] Sergey I. Bozhevolnyi and Thomas Søndergaard. General properties of slow-plasmon resonant nanostructures: nano-antennas and resonators. *Optics Express*, Vol. 15, No. 17, p. 10869, 2007.
- [66] Edward D. Palik. *Handbook of Optical Constants of Solids*. Academic Press, 1985.
- [67] G Ghosh. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals. *Optics Communications*, Vol. 163, No. 1-3, pp. 95–102, 1999.
- [68] 藤田博之編著. センサ・マイクロマシン工学. オーム社, 2005.
- [69] S. Timoshenko. Analysis of Bi-Metal Thermostats. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 11, No. 3, pp. 233–255, 1925.
- [70] Manabu Ataka, Akito Omodaka, Naohiro Takeshima, and Hiroyuki Fujita. Fabrication and operation of polyimide bimorph actuators for a ciliary motion system. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 2, No. 4, pp. 146–150, 1993.
- [71] Ankur Jain, Hongwei Qu, Shane Todd, and Huikai Xie. A thermal bimorph micromirror with large bi-directional and vertical actuation. *Sensors and Actuators, A: Physical*, Vol. 122, No. 1 SPEC. ISS., pp. 9–15, 2005.
- [72] Lei Wu and Huikai Xie. A large vertical displacement electrothermal bimorph microactuator with very small lateral shift. *Sensors and Actuators, A: Physical*, Vol. 145-146, No. 1-2, pp. 371–379, 2008.
- [73] Y. Li, Q. Zheng, Z. Wang, R. Katragadda, W. Khalid, R. P. Panguluri, B. Nadgorny, P. M. Hoffmann, and Y. Xu. Development of micro scanning multiprobes for material characterization. *SENSOR LETTERS*, Vol. 6, pp. 299–304, 2008.
- [74] M.F. Ashby, D.R.H.Jones 著, 堀内良, 金子純一, 大塚正久訳. 材料光学入門 正しい材料選択のために. 内田老鶴圃, 2011.
- [75] 麻生和夫, 谷順二, 長南征二, 林一夫. 新機械工学シリーズ 機械力学. 朝倉書店, 1986.

-
- [76] 金原粲他編. 薄膜の力学的特性評価技術 : トライボロジー・内部応力・密着性. リアライズ社, 1992.
- [77] Ruiwen Liu, Binbin Jiao, Yanmei Kong, Zhigang Li, Haiping Shang, Dike Lu, Chaoqun Gao, and Dapeng Chen. Elimination of initial stress-induced curvature in a micromachined bi-material composite-layered cantilever. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 23, No. 9, p. 095019, 2013.
- [78] Kaichen Dong, Shuai Lou, Hwan Sung Choe, Kai Liu, Zheng You, Jie Yao, and Junqiao Wu. Stress compensation for arbitrary curvature control in vanadium dioxide phase transition actuators. *Applied Physics Letters*, Vol. 109, p. 023504, 2016.
- [79] G. G. Stoney and C. A. Parsons. The tension of metallic films deposited by electrolysis. 1909.
- [80] American Institute of Physics and Dwight E. Gray. *American Institute of Physics Handbook*. McGraw Hill, 3 edition, 1972.
- [81] Aron Michael and Chee Yee Kwok. Thermo-mechanical behavior of buckled multi-layered micro-bridges. *Sensors and Actuators, A: Physical*, Vol. 137, No. 1, pp. 157–168, 2007.
- [82] 平尾雅彦. 材料力学序論. 培風館, 2000.
- [83] (社) 応用物理学会 日本光学会 光設計研究グループ監修. 回折光学素子入門 増補改訂版. オプトロニクス社, 2006.
- [84] I. H. Malitson. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica. *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 55, No. 10, pp. 1205–1209, 1965.
- [85] 黒田和男著. 光学ライブラリー 3 物理光学-媒質中の光波の伝搬-. 朝倉書店, 2011.

業績リスト

発表者は○で示した.

学術論文

1. 志村崇, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「面外熱駆動 Au ナノグレーティングを用いたマイクロ光学位相子の透過率変調」, 電気学会論文誌 E, 137 巻 11 号 p. 400-406, (2017)
[第5章に対応]
2. Takashi Shimura, Takuya Kinoshita, Yuji Koto, Norihiro Umeda, and Kentaro Iwami “Birefringent reconfigurable metasurface at visible wavelengths by MEMS nanograting”, Appl. Phys. Lett., **113**, 171905 (2018)
[第4章に対応]

国際会議 (Proceedings)

1. Takashi Shimura, Kentaro Iwami, Miho Ishii, Hideaki Nagasaki, and Norihiro Umeda, “Birefringence modulation of thermally-driven metal nanograting”, Proc. SPIE, 95441K (2015)
[第5章に対応]

国際会議

1. Takashi Shimura, ○ Kentaro Iwami, Miho Ishii, Norihiro Umeda, “CONFIGURABLE OPTICAL RETARDER BASED ON PLASMONIC GRATING INTEGRATED WITH BIMORPH ACTUATOR”, 2014 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN2014), Glasgow, UK, pp. 139-140, August (2014)

2. Takashi Shimura, Takuya Kinoshita, Miho Ishii, ○ Kentaro Iwami, and Norihiro Umeda, “Optical phase modulator based on mechanical deformable plasmonic grating”, The 10th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics (APNFO10), Oral 114, Hakodate Research Center for Fisheries and Oceans, Hokkaido, Japan, July (2015)
3. ○Takashi Shimura, Kentaro Iwami, Miho Ishii, Hideaki Nagasaki, and Norihiro Umeda, “Birefringence modulation of thermally-driven metal nanograting”, SPIE Optics + Photonics 2015, 9544-50, San Diego Convention Center, San Diego, California, US August (2015)
4. ○ Kentaro Iwami, Takuya Kinoshita, Takashi Shimura, Kentaro Iwami, Miho Ishii, Hideaki Nagasaki, and Norihiro Umeda, “Optical Phase Modulator based on Mechanically Reconfigurable Metamaterial”, FTT2015, Hakodate, Japan, August (2015)
5. ○Takashi Shimura, Norihiro Umeda and Kentaro Iwami, “Birefringence Modulation of Thermally - Driven Plasmonic Grating”, The 11th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2016), 1077, Matsushima Bay and Sendai MEMS City (L-Park Sendai and Hotel Matsushima Taikanso), Miyagi, Japan, April (2016)
6. ○ Kentaro Iwami, Takuya Kinoshita, Takashi Shimura, and Norihiro Umeda, “Suspended Au nanograting optical retarder for electrostatic reconfiguration”, The 11th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO11), National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, September (2017)

国内学会

1. ○志村崇, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「熱アクチュエータを利用したアクティブナノスリット光学位相子」, 日本機械学会関東学生会第53回卒業研究発表講演会, 東京農工大学, 3月 (2014)
2. ○志村崇, 石井美帆, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「熱バイモルフを利用したアクティブナノスリット光学位相変調器」, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 東京大学生産技術研究所, 東京都, 5月 (2014)

3. ○岩見健太郎, 志村崇, 石井美帆, 梅田倫弘, 「金属ナノグレーティングを用いた可視・紫外光学位相子と可変メタマテリアルへの応用」, 第39回光学シンポジウム, 東京大学生産技術研究所, 東京都, 6月(2014)
4. ○志村崇, 石井美帆, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「熱駆動型金属ナノスリットを用いたマイクロ光学位相変調器」, 第31回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, くにびきメッセ, 島根県松江市, 10月(2014)
5. ○志村崇, 石井美帆, 岩見健太郎, 長崎秀昭, 梅田倫弘, 「熱駆動するプラズモニック Au ナノグレーティングの複屈折変調」, 日本光学会ナノオプティクス研究グループ第21回研究討論会, 山梨大学, 山梨県甲府市, 3月(2015)
6. ○木下卓哉, 志村崇, 石井美帆, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「静電駆動ナノグレーティングによる光位相変調素子」, 第32回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 朱鷺メッセ, 新潟県新潟市, 10月(2015)
7. ○志村崇, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「熱駆動するプラズモニック Au ナノグレーティングを用いたマイクロ光位相変調素子」, 日本光学会ナノオプティクス研究グループ第22回研究討論会, 東京農工大学, 東京都小金井市, 3月(2016)
8. ○木下卓哉, 志村崇, 石井美帆, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「金ナノグレーティング構造の静電駆動による光位相変調」, 電気学会 E 部門総合研究会, 金沢市文化ホール, 石川県金沢市, 6月(2016)
9. ○志村崇, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「埋め込み Si 犠牲層プロセスを用いた Au ナノグレーティング光位相変調素子」, 電気学会 E 部門フィジカルセンサ/マイクロマシン・センサシステム合同研究会, 国立研究開発法人物質・材料研究機構, 茨城県つくば市, 12月(2016)
10. ○志村崇, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「Au/Si バイモルフ梁を集積化したナノグレーティング光位相変調素子の光学特性評価」, 電気学会 E 部門総合研究会, イーグレひめじ, 兵庫県姫路市, 6月(2017)
11. ○湖東裕士, 城光寺佑樹, 木下卓哉, 志村崇, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「静電駆動金ナノグレーティングによる位相差変調」, 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 福岡県福岡市, 9月(2017)

参考文献

12. ○志村崇, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「Au/Si バイモルフ梁を配列したナノグレーティング光位相差変調素子の光学特性評価」, 日本光学会ナノオプティクス研究グループ第 24 回研究討論会, 富士フイルム株式会社西麻布本社, 東京都, 12 月 (2017)
13. ○湖東裕士, 木下卓哉, 志村崇, 岩見健太郎, 梅田倫弘, 「金ナノグレーティングに生じる内部応力の調整」, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, ベルサール高田馬場, 東京都, 3 月 (2018)
14. ○志村崇, 梅田倫弘, 岩見健太郎, 「両持ちバイモルフ梁を集積化した面外駆動 Au/SiO₂ グレーティングの製作」, 第 35 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 札幌市民交流プラザ, 北海道札幌市, 10 月 (2018)
15. ○湖東裕士, 志村崇, 安忠烈, 岩見健太郎, 「静電駆動型金ナノグレーティング位相差変調器における内部応力の制御」, 第 9 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 札幌市民交流プラザ, 北海道札幌市, 10 月 (2018)

受賞歴等

1. 志村崇, 日本光学会ナノオプティクス研究グループ第 21 回研究討論会・ナノオプティクス賞
2. 志村崇, 平成 27 年度海外渡航助成, 公益財団法人精密測定技術振興財団, 2015 年 3 月

その他

1. ○志村崇, 岩見健太郎, 「電子ビーム描画を利用した金属メタサーフェス光変調素子」, 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム 平成 30 年度利用成果発表会, 東京大学, 東京都文京区, 9 月 (2017)