

博士 (工学) 学位論文

角度走査型プラズモニック光検出器による
近赤外分光素子の研究

2022 年 3 月 提出

電気通信大学 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻

大下 雅昭

角度走査型プラズモニック光検出器 による近赤外分光素子の研究

博士論文審査委員会

青山 尚之 教授

Sandhu Adarsh 教授 (基盤理工学専攻)

内田 雅文 教授

金森 哉吏 教授

菅 哲朗 准教授 (主任指導教員)

著作権所有者

大下 雅昭

2021

論文の英文要旨

T I T L E	角度走査型プラズモニック光検出器による近赤外分光素子の研究 Near-infrared spectrometer using an angular scanning plasmonic photodetector
N A M E	大下 雅昭 Masaaki Oshita

Near-infrared spectroscopic imaging has been applied in various fields such as detection of tumor site and foreign substances in food. Coaxial and simultaneous imaging of RGB images and spectroscopic imaging allows recording spatiotemporally correspondence between these methods. Half-mirror and filter array methods are available for coaxial spectral imaging with RGB images, but these technologies have limitations in miniaturization. If a near-infrared spectrometer is embedded as a pixel in the RGB imager, spectral imaging on a small device such as a capsule endoscope becomes possible. However, conventional spectrometers require multiple photodetectors or electrostatic drive mechanisms around the photosensitive area, making it difficult to integrate them into a pixel. A promising candidate for solving this problem is a spectroscopy method using the photocurrent output from a gold grating plasmonic photodetector. This method uses only a single photodetector, and vertical integration of a driving electrode on the back of the photodetector reduces the in-plane dead space. However, this gold grating-based method used a large rotating stage to scan an angle of incidence for spectroscopy. Here, we propose a spectrometer using this gold grating-based method with on-chip mechanism for scanning an incident angle. In this study, sound pressure, which does not interfere with the photocurrent measurement, was used as a driving force for the angle scanning to remove the influence caused by the electrostatic drive. The spectrometer consists of a gold diffraction grating on an n-type Si cantilever, and the cantilever resonates with the sound pressure to scan the angle of incidence to the gold diffraction grating. The spectroscopic method was verified using both acoustic and electrostatic drives, and we demonstrated that our device has comparable wavelength resolution versus commercial spectrometers.

論文の和文概要

論文題目	角度走査型プラズモニック光検出器による近赤外分光素子の研究
氏名	大下 雅昭
<p>近赤外分光撮像は腫瘍部位の特定や異物の検出など様々な分野で応用されている。従来型の分光撮像素子には多くの面積を専有するハーフミラー方式やフィルタアレイ方式があるが、これらの技術では小型化に限界があった。RGB撮像素子に近赤外分光器を画素として組み込めば、カプセル内視鏡等の小型デバイス上での分光撮像が可能になるが、従来型の分光器は複数の光検出器もしくは受光部周辺に静電駆動機構が必要であり、画素内に集積させるのは困難であった。本研究の分光素子はn型Siのカンチレバー上に単一の金回折格子型光検出構造を形成した構造であり、カンチレバーの背面に駆動用電極の垂直統合し、面内に画素として集積できる。本研究では、音圧駆動と静電駆動の双方で分光機能の検証を行い、本研究の素子が市販分光器に匹敵する波長分解能をもつことを実証した。</p>	

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	従来の分光器の問題点	3
1.3	本研究の目的	6
1.4	本論文の構成	8
第 2 章	分光素子の原理	11
2.1	分光素子の動作原理	12
2.2	金回折格子における表面プラズモン共鳴	14
2.3	入射角走査時の光電流信号	17
2.4	光電流信号を用いた分光	19
第 3 章	分光素子の設計及び製作	21
3.1	分光素子の設計	21
3.2	カンチレバーの寸法の決定	23
3.3	有限要素法による共振周波数の計算	26
3.4	構造変形時の受光部の曲率	26
3.5	分光素子の製作の概要	28
3.6	使用したフォトマスク	30
3.7	反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching, RIE) による回折格子の形成	31
3.8	金・アルミニウムの蒸着と成形	34
3.9	アルミエッチャントによるアルミニウム形成	37
3.10	アルミニウムのリフトオフ形成	38
3.11	撥水性の有無の判断方法	41

3.12	電流電圧特性の計測	42
3.13	深堀り反応性イオンエッチング (Deep Reactive Ion Etching, DRIE) によるカ ンチレバーの形成	43
3.14	フッ酸蒸気エッチング	47
3.15	基板への実装	50
3.16	ショットキー障壁高さの計算	52
第 4 章	分光素子の基礎特性	57
4.1	金回折格子型プラズモニック光検出器の入射角特性	57
4.2	カンチレバーの機械的特性	60
4.3	音圧によるプラズモニック光検出器の入射角特性の計測	64
第 5 章	音圧駆動による分光	69
5.1	市販分光器による入射スペクトルの計測	70
5.2	電流電圧変換アンプの高帯域化	70
5.3	回転ステージによる角度走査を利用した分光	73
5.4	音圧による角度走査を利用した分光	76
第 6 章	入射角走査機構の静電駆動化	81
6.1	外部電極での静電駆動による入射角走査	82
6.2	静電駆動時における光電流信号の計測及び分光計測	84
第 7 章	結論	89
7.1	本論文のまとめ	89
7.2	今後の課題・展望	91
	謝辞	93
	参考文献	95

第 1 章

序論

1.1 研究背景

分光イメージングは物体の透過・反射スペクトルを二次元的に取得することで混合物中から対象をスペクトルによって非破壊・非接触に検出できることから様々な領域において応用されている [1,2]。反射・透過スペクトルには測定対象に含まれる分子が吸収した光の波長及び強度の情報が含まれるため、スペクトルから測定対象内に特定の分子が存在しているか否かがわかる。また、一般に物質ごとの反射・透過スペクトルは異なるため、分光イメージングではこのスペクトルの差異を検知することで対象の分布を知ることができる応用例を挙げるとサトウキビの葉に存在する疾患の特定 [3] や腫瘍部位の同定 [4] などがある。特に近赤外領域 ($\lambda = 750 \sim 2500$ [nm]) の光は生体透過性が高く、この波長帯で分光イメージングを行うことで例えば組織深部に存在する腫瘍や食品内の異物を検出できる (Fig.1.1)。

分光イメージングを行う装置は一般的にハイパースペクトルイメージャ (Hyperspectral imager, HSI) と呼ばれており、様々な種類の HSI が提案されている [5,6]。中でもハーフミラーなどを用いて HSI と RGB 撮像素子に入射光を分割し、分光イメージングによる像 (分光像) に加えて RGB 像を同軸かつ同時に撮影する HSI は、RGB 像での位置及び時刻と分光像を一致させることができる [7]。この構成は RGB 像と分光像との対応が必要となる場合に有用である。しかし、この構成ではハーフミラーが専有する領域が撮像素子の面積とその短辺を乗算した立方体になり、非常に多くの体積を必要とする。さらに、撮像素子に入射する可視光の光量が半減するという欠点がある。この問題を解決するために透過スペクトルの異なるフィルタをアレイして分光像を得る方法が提案されている [8-10]。この構造はフィルタ数により波長分解能が決定される。撮像素子の面積に制限がある場合、設置できるフィルタ数も制限さ

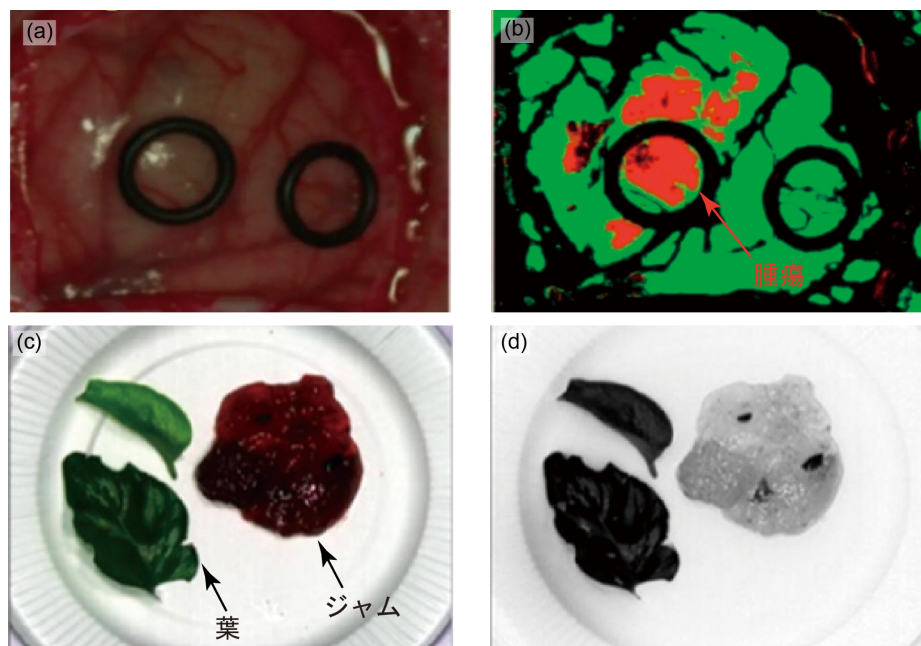


Fig.1.1: 近赤外分光イメージングの応用例. (a) 腫瘍が存在する組織表面の可視像. (b) 可視～近赤外 (450~900 [nm]) のスペクトルから腫瘍部を表示した像 [4]. (c) ジャム内に葉などの異物が混入した様子を可視で撮影した像. ジャム内の葉は全く確認できない (d) 波長 685 [nm] と 750 [nm] (近赤外領域) のコントラストを可視化した像. ジャム内の葉を確認できる^{*1}

れるため波長分解能も制限される。したがって、一定の波長分解能を維持したまま撮像素子の面積を縮小できず、小型化には限界がある。この問題の解決策として Fig.1.2 のように通常の RGB 撮像素子の画素内に分光器を組み込むという方法が考えられるが、従来型の分光器では画素内への組み込みは困難であった。

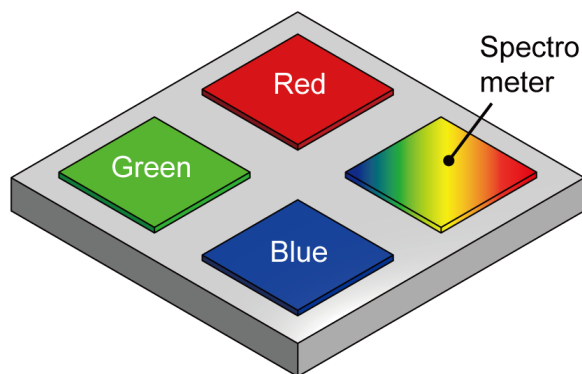


Fig.1.2: 分光素子を組み込んだ RGB 撮像素子の概念図

RGB 撮像素子内に分光器を組み込むことが可能になれば、通常の撮像素子は搭載できるが、

^{*1} <https://www.klv.co.jp/product/contents/food-industry-hyperspectral-camera.html>

HSI が搭載できなかったデバイス上での分光イメージングが可能になる。例えば、カプセル内視鏡 (Fig.1.3(a)) において腫瘍部位を近赤外分光イメージングで発見し、その部位の表面を可視像で記録することが可能になる。また、スマートグラス等 (Fig.1.3(a)) のスマートデバイス上への搭載も可能になり、例えば、食料品の内部に存在する異物を視覚にオーバーレイして表示する技術への応用が期待できる。



(a) カプセル内視鏡*2



(b) スマートグラス*3

Fig.1.3: 近赤外分光素子を組み込んだ RGB 撮像素子の応用先

1.2 従来の分光器の問題点

従来の回折格子による光の分散を利用した分光器は入射光を波長ごとに分散し、各波長をそれぞれ別個の光検出器で計測する [11–13]。Fig.1.4 (a) の通りにこの方法は回折格子から光検出器までの光路長が短縮されると、十分に入射光が分散されないため、各波長を別個に検出できない。つまり、実用的な精度の分光には一定の光路長が必須であり、画素サイズへの小型化が原理上できない問題があった。

この波長分散を利用した分光器が提案されてから現在に至るまで様々な小型分光器が提案されてきた [14]。従来型の分光器は主に 4 つに大分され、回折格子型の他に Fabry-Pérot 型 [15–18]・Fourier-transform infrared (FTIR) 型 [19–22]・再構成型 [9, 10, 14, 23–27] がある。以下では各種類の分光器の仕組みと画素内に組み込む際の問題点について述べる。まず、Fabry-Pérot 型は鏡の間隔を操作し、任意の波長を透過させ分光をする (Fig.1.4 (b))。Fabry-Pérot 型は波長分散を利用しておらず、光路長による波長分解能の制限もない。この構造は鏡の間隔を制御するために、Fig.1.5 に示すとおりに入射部周辺に静電駆動するための電極が必要であり、画素として集積する場合、画素間に大きく隙間を取る必要がある。さらに鏡の平行度が低下す

*2 <http://medical.olympusamerica.com/products/endocapsule>

*3 <https://www.nreal.ai/light/>

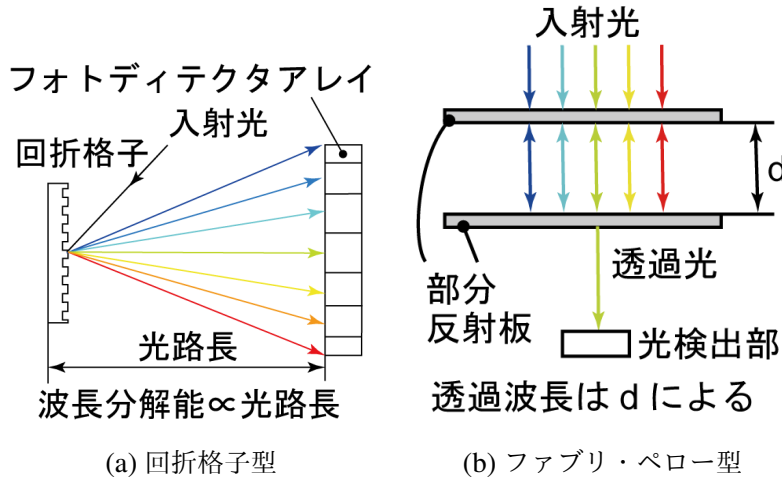


Fig.1.4: 従来の近赤外分光器

ると波長分解能が著しく低下するため、鏡の平行度も制御する必要がある。鏡の間隔や平行度を制御するための電極の面積を一定以上確保する必要があり、現状において $1 [\text{mm}^2]$ の以下のサイズのもの存在していない。したがって、Fabry-Pérot 型分光器を画素内に組み込むことは現実的ではない。

そこで Fabry-Pérot 型フィルタを画素内に埋め込むのではなく、フィルタの面積を撮像素子全域にまで広げて分光像を取得する方法が提案されている [28]。この方法であれば撮像素子全域に入射する透過波長を制御し、分光像を得ることができる。しかし、Fabry-Pérot 型フィルタは分光可能な波長域を可視域 ($400\sim 700 [\text{nm}]$) と近赤外域 ($750\sim 2500 [\text{nm}]$) の両方を同時に取ることはできない。以下では、Fabry-Pérot 型フィルタの分光可能な波長域について述べる。Fabry-Pérot フィルタの透過率がピークを示す波長は Eq. (1.1) で表現できる [29, 30]。

$$\lambda = 2nd \cos(\theta)/q \quad (1.1)$$

ただし、 d はミラー間距離、 λ は入射波長、 q は干渉次数 ($q = 1, 2, \dots$)、 n はミラー間の媒質の屈折率、 θ は入射角である。あるミラー間距離 d では干渉次数 q によって複数の波長が透過しうるため、Fabry-Pérot 型は前面にバンドパスフィルタを設置し、分光可能な波長の範囲を制限しなければならない。入射角を $\theta = 0 [\text{deg}]$ と考えると、この範囲の下限は $\lambda_{\min} = 2nd/(q + 1)$ となる。したがって、分光可能な波長範囲の大きさは Eq. (1.2) になる。

$$\lambda - \lambda_{\min} = 2nd \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{q+1} \right) \quad (1.2)$$

Eq. (1.2) の右辺は q によって単調減少するため、波長範囲は $q = 1$ のとき最大になる。

したがって、Eq. (1.1)、Eq. (1.2) より単一のフィルタにより分光可能な最大の波長範囲は $\lambda_{\min} < \lambda < 2\lambda_{\min}$ になる。つまり、分光可能な波長範囲はその下限 λ_{\min} によって決定され、例えば波長の下限を可視域の下端である $\lambda_{\min} = 400$ [nm] とおくと、単一の Fabry-Pérot フィルタで扱える範囲は、400~800 [nm] となる。この範囲では近赤外域のほとんどの部分をカバーできない。したがって、Fabry-Pérot フィルタによって撮像素子全面を覆う場合には可視撮像と近赤外分光イメージングは両立できない。

Fabry-Pérot フィルタと同様に透過波長を制御する方法については Acousto-optic tunable filter(AOTF) [31] と Liquid crystal tunable filter(LTCF) [32] がある。AOTF は複屈折結晶に対して電圧もしくは音圧を印加することで、透過率を制御する。AOTF はこの複屈折結晶内において回折格子型と同様にスペクトルを空間的に分離することで分光を行っており、結晶サイズによる制約がある。LTCF は AOTF と同じく複屈折結晶を積層することで作られており、画素サイズへの小型化には適さない。

FTIR 型は、光の干渉縞を計測し、その干渉縞をフーリエ変換することで分光を行う。まず、FTIR 型の典型的な動作原理について述べる。Fig.1.6 のように入射光をハーフミラーによって2つに分割し、片方を可動式の鏡へ、もう片方を固定された鏡へと入射する。入射光は各鏡によって反射され、ハーフミラーに再度入射し、最終的に光検出器に入力される。ここで可動式の鏡を動かすことで、ハーフミラーで2つに分割した光の光路差が変化し、光検出器において干渉縞が観測できる。FTIR 型ではこの干渉縞をフーリエ変換することで入射スペクトルを得る。しかし、上記の動作原理のとおり、可動式の鏡を動かすための静電駆動機構やハーフミラーを面内に形成する必要があるため、画素としての集積は現実的ではない。また、面内に干渉計を構築しなければならない都合上、面内に垂直に入射する光源に対応するのは困難である。

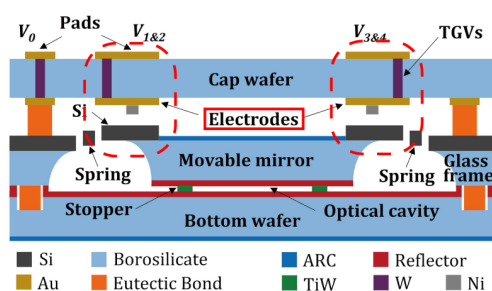


Fig.1.5: Fabry-perot 型分光器の構造 [30]

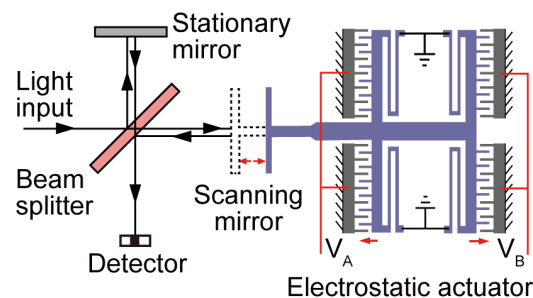


Fig.1.6: FTIR の構造 [19]

再構成型は、Fig.1.7 のように互いに異なる光応答スペクトルを持つ、複数の光検出器からの入射スペクトルを、逆問題のアプローチを用いて再構成するものである。近年では、100 [μm] 以下のサイズの再構成分光器も報告されてきており、ラボオンチップや *in vivo* での計測など

への応用が期待されている [14]。しかし、現状の再構成型分光器は、原理上複数の光検出器を必要としており、この構造上の欠点は撮像素子への適用において妨げとなる。

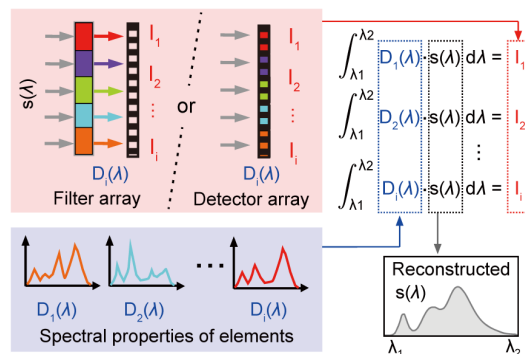


Fig.1.7: 再構成型分光器の構造 [9, 25]

1.3 本研究の目的

本研究では撮像素子に組み込み可能な近赤外分光器の原理検証を目的とする。撮像素子に近赤外分光器を組み込むことができれば、通常の撮像素子は搭載できるが、HSI が搭載できなかったデバイス上での RGB 像と近赤外分光像の同軸・同時撮影が可能になる。例えば、カプセル内視鏡やスマートグラスなどの RGB 像を撮像する必要がある小型デバイス上において追加で近赤外分光像を撮像をする場合に有効だと考えられる。近赤外分光器の撮像素子への組み込みに際して、従来の分光器は以下の理由で適用が困難であった。

- Fabry-Pérot 型はフィルタ間の距離を制御するための電極が受光部周辺に必要であり、画素として集積する場合、画素間に大きく隙間を取る必要がある。また、Fig.1.5 のような複雑な構造になっているため、現在の技術では $1 [\text{mm}^2]$ 以下のフットプリントをもつものは存在しておらず、画素内に組み込むことは現実的ではない。また、Eq. (1.2) により、分光可能な領域が制限されており、例えば撮像素子全域をフィルタレスペクトルを得たとしても可視像と近赤外分光像も同軸で撮影することができない。
- FTIR は面内に干渉計・静電アクチュエータを構成しなければならない、画素としての集積は現実的ではない。
- 再構成型は複数の光検出器を必要としており、設置面積の縮小には限界がある。さらに、2次元状に光検出器をアレイする場合、各光検出器への配線を行わなければならない。

以上の問題を解決するための方法として、プラズモニック光検出器 [33–35] を利用した方法が有望な候補として挙げられる。プラズモニック光検出器は微細な金属構造上で発生する表面プラズモン共鳴 (Surface Plasmon Resonance, SPR) の非放射的減衰によって発生するホット電子を主に金属半導体接合で検出する構造になっている。SPR によって金属表面に特定の条件 (波長・偏光) の光が吸収されることで、条件を絞った光検出が可能になっている [36–38]。この特性によって、特定の波長の抽出と光検出を受光面内で完結できる。[37,39]。このプラズモニック光検出器を利用して分光を行った研究として、Chen らの方法 [40] がある。Chen らは金回折格子構造が入射角に対応した波長の光を吸収する性質を利用し、構造上で発生する SPR を金-Si 界面のショットキー接合で電流として検出し分光を行った (Fig.1.8)。この研究では入射角により検出波長が異なるプラズモニック光検出器に対する入射角を走査することで、入射スペクトルを計測する。

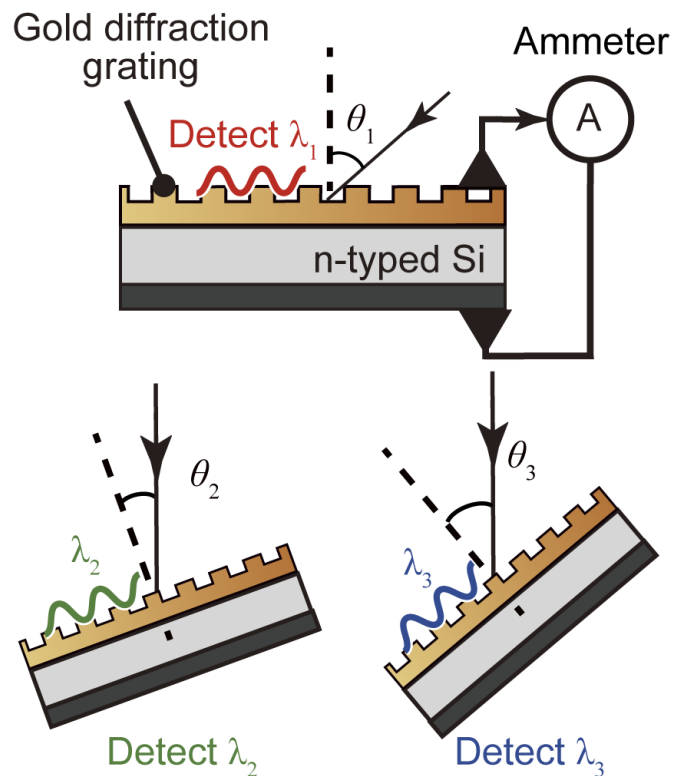


Fig.1.8: 金回折格子型プラズモニック光検出器を利用した分光 [40]

この構造による分光は単一の光検出器のみを用いており、受光面に垂直入射する光源にも対応しているため撮像素子上への集積に適する。しかしながら、現時点では入射角の変化を大型回転ステージによって行っており、実用化のためにはこの角度走査機構のオンチップ化が必要となっていた。角度走査機構のオンチップ化に際しては、Fig.1.9 のように静電駆動用の電極

を光検出器の背面に垂直統合することで、Fabry-Pérot 型や FTIR 型のように受光面周辺を専有していた静電駆動機構によるデッドスペースを排除できる。

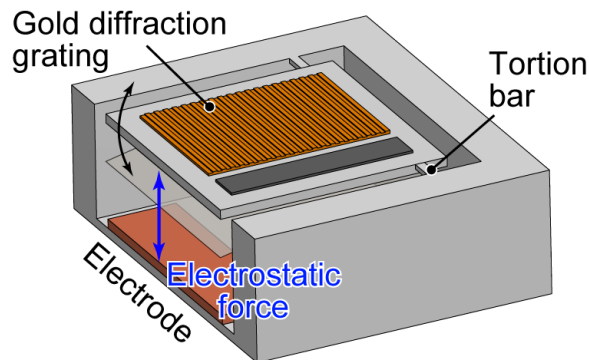


Fig.1.9: 金回折格子型プラズモニック光検出器と角度走査機構のオンチップ化

プラズモニック構造をオンチップで変形させ、構造の反射スペクトルや透過スペクトルを変化させる研究は広く研究されており [41–43]、デバイス構造の変形 [44–54]、やバイアス電圧の印加 [55,56] を利用した方法が報告されている。しかしながら構造の変形を利用して検出する光の波長などを変化させるプラズモニック光検出器は報告されていなかった。

本研究では金回折格子型プラズモニック光検出器への入射角を走査するための機構をオンチップ化し、実際に分光が可能か検証を行う。角度走査機構をオンチップ化する場合、Fig.1.9 のように静電力を用いて駆動することで動力源を Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) モジュールとして統合できるが、同時に光検出器に電圧を印加してしまう。この電圧により光検出器に電流が流れ、光検出器が出力する光起因の電流に混入すると考えられる。そこで、本研究ではまず静電力に起因する電流を除外して計測を行うために電流計測に干渉しない音圧を駆動力として採用する。具体的には音圧で駆動可能な n 型 Si の MEMS カンチレバー上に金回折格子を形成した構造を用いて分光計測を行う。この構造は音圧によりカンチレバーを振動させ、金回折格子への入射角を走査し、分光を行う。本論文では、この構造で分光が可能か検証を行った結果と最終的に静電駆動をしつつ、入射スペクトルの計測を行った結果について論じる。

1.4 本論文の構成

本論文は全 7 章で構成され、概要は以下の通りである。第 1 章では、本研究の目的と意義を述べる。また、本研究に関係する従来の研究を紹介する。第 2 章では、分光素子の動作原理について説明する。本研究のプラズモニック光検出器は、金属の微細構造であるプラズモ

ニック構造上で発生する表面プラズモン共鳴と金属と半導体界面に形成されるショットキー障壁を用いた仕組みになっており、それらの現象について詳細に述べる。第3章では、MEMSによるカンチレバー型のプラズモニック光検出器の設計及び製作方法について述べる。SOI (Silicon-on-Insulator) 基板を用いた、バルクマイクロマシニングの方法により、外部からの力入力により単振動を行い、金回折格子への入射角度を変調可能な分光素子を製作する。第4章では、試作した分光素子の光検出特性及び機械的特性などの基礎特性について評価を行った結果について述べる。第5章では分光素子のカンチレバー構造を、外部のスピーカーによって音圧で駆動し、分光を行った結果について述べる。第2章の理論を発展させ、時間的に繰り返し入力される光電流信号を対象として、分光を実施する。分光に際して、音圧駆動時の機械構造の応答特性評価や、電気的特性の評価を行う。さらに、MEMS デバイス測定に適した電気回路の設計と評価、分光機能の実証について述べる。第6章では、第5章で扱った音圧ではなく、MEMS モジュールに組み込みが可能な静電駆動を採用して分光を行った結果について述べる。ただし、この場合は分光素子に電圧が印加されるため、静電駆動に起因する電流が計測データに混入する。本章ではこの問題を解決する計測方法とその結果について述べる。第7章では本論文に関する総括を行い、結論と今後の展望を述べる。

第 2 章

分光素子の原理

この章では本研究で提案する近赤外分光素子がどのような原理で動作するのかについて述べる。本研究の分光素子は音圧で振動する n 型 Si の MEMS カンチレバー上に金回折格子を形成した構造となっており、金回折格子への入射角をカンチレバーの振動により走査して分光を行う。本研究の分光器の動作には大きく分けて 2 つの段階がある。まず一段目に音圧で入射角を走査しながら、金回折格子型プラズモニック光検出器が出力する入射角ごとの電流を計測する段階がある。この段階の動作原理については 2.1 節で概要を述べている。二段目では入射角ごとの光電流信号から入射光のスペクトルを計算する。この段階については 2.4 節で述べる。2.2 節では本研究で扱う金回折格子上での SPR の挙動について述べる。2.3 節ではカンチレバーで角度走査している状態で金回折格子に単色光を入射した場合に分光素子が出力する光電流信号の形状について述べる。

2.1 分光素子の動作原理

本論文が提案する分光素子の動作原理について述べる。まず、音圧で入射角を走査できる最も単純な構造としてカンチレバーの上に金回折格子を形成した構造が挙げられる。音圧は大気圧からの圧力の変動分なため [57]、カンチレバーに音圧を照射すると、カンチレバーの表面と裏面に圧力差が発生する。音圧が平面波である場合、カンチレバーに対してはこの圧力差により陰圧方向に等分布荷重がかかっている状態になる。このとき構造が単純なカンチレバーになっていた場合、金回折格子部分に変形し、入射角変化に起因しない光検出特性の変化が発生する。そこで本研究では、カンチレバー上の金回折格子が形成されていない部分のみ剛性を低下させることでこの問題に対処する。本研究の角度走査機構の概形を Fig.2.1 に示す。機構の構造は、金回折格子が形成されている正方形の板の部分と蛇腹状になっている足の部分で構成されている。正方形の板の部分には金回折格子が形成されており、この部分で入射光を受光する。カンチレバーは n 型 Si であるため、金回折格子とカンチレバーとの界面にはショットキー障壁が形成される。この機構では金回折格子表面で発生した SPR をこのショットキー障壁で検出する。次に足の部分はカンチレバーの剛性を下げるために蛇腹状になっており、金回折格子部を変形させることなくカンチレバーの振動の振幅を大きくできるようになっている。入射角走査が左右対称に行われなくても入射角走査に起因しない特性の変化が発生するため、カンチレバーの形状は左右対称にした。

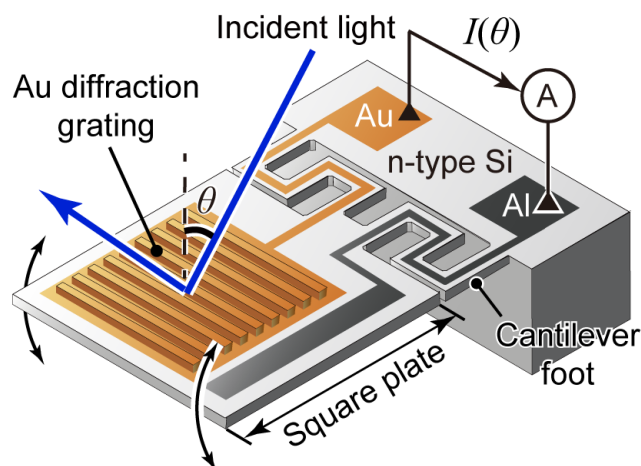


Fig.2.1: 金回折格子型プラズモニック光検出器のためのオンチップ角度走査機構

本研究の分光素子が光電流信号を出力する仕組みについて述べる。まず、金回折格子に光を入射し (Fig.2.1)、カンチレバーに音圧を与えると、カンチレバーが共振する。カンチレバーの

共振により、入射角は Fig.2.2 のように $\theta_1 \sim \theta_3$ と変化する。TM(Transverse magnetic) 偏光成分の入射波長と角度 θ が共鳴条件を満たすと SPR が発生し、金回折格子の表面において入射光の吸収が発生する。

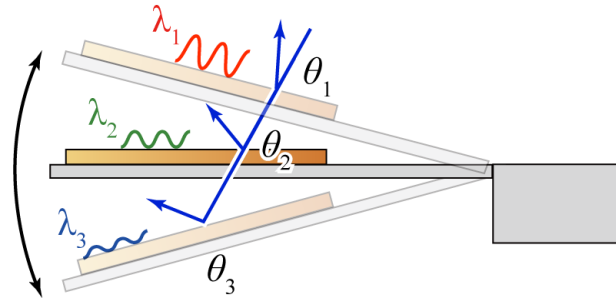


Fig.2.2: 音圧で振動し、特定の入射角で対応する波長を吸収する様子

吸収された入射光は金内部の自由電子を励起し、自由電子は金と n 型 Si の間にあるショットキー障壁を飛び越えて n 型 Si 側に移動する (Fig.2.3)。このとき、電子の移動が発生するため逆方向に光電流が発生する。本研究ではこの光電流信号を入射角ごとに計測することで分光を行う [40]。また単色光入力時に光検出器が出力する入射角ごとの光電流の値を本研究では光検出器の入射角特性と呼ぶものとする。金回折格子表面の吸収率は SPR が発生する入射角でピークを取り、ショットキー障壁が出力する光電流は金属表面の吸収率に比例するため [58]、入射角ごとの光電流のグラフも Fig.2.4 のように SPR 発生角でピークを取る。

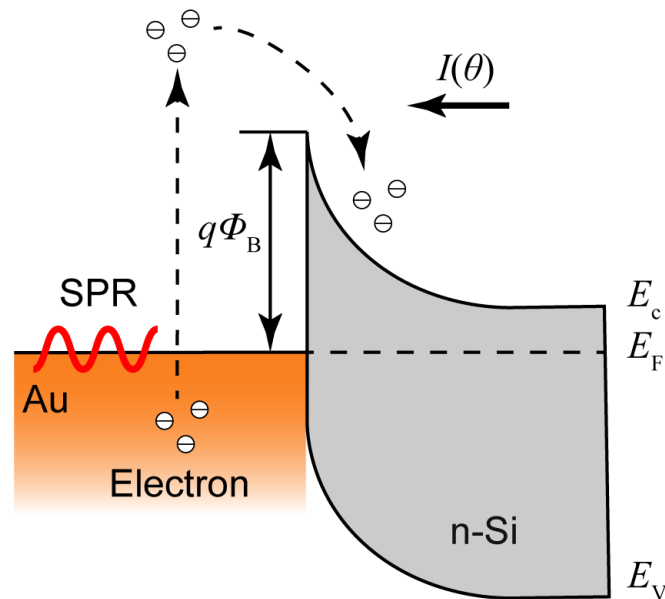
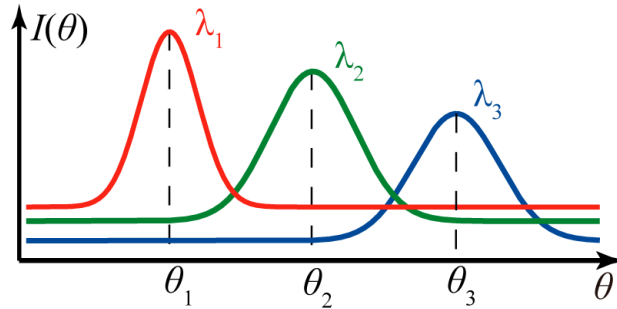


Fig.2.3: ショットキー障壁による SPR によって励起された電子の光電流 $I(\theta)$ への変換

Fig.2.4: 光電流信号 $I(\theta)$ の波形

2.2 金回折格子における表面プラズモン共鳴

本論文の分光素子の金回折格子での SPR の挙動について述べる。まず、プラズモンとは金属内の自由電子の集団振動、言い換えると電荷の疎密波である。プラズモンは金属内の電荷が偏って生じる電場によって生じる力と自由電子の運動方程式によってモデル化される。この自由電子の集団が単振動する周波数はプラズマ周波数 ω_p と呼ばれ、Eq. (2.1) で表現される [59]。

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}} \quad (2.1)$$

ここで、各変数を以下のように定義する。

N 自由電子の体積密度 (物質によって異なる)

m 自由電子の質量: $9.10938356(11) \times 10^{-31}$ [kg]

ϵ_0 真空の誘電率: $8.854187817 \times 10^{-12}$ [F/m]

e 電気素量: $1.6021766208(98) \times 10^{-19}$ [C]

次に、表面プラズモン (Fig.2.5) は金属と誘電体の界面に局在する電磁場であり、自由電子の疎密波と金属表面の電場が結合することで金属表面に発生する。この表面プラズモンが入射光により発生する現象を表面プラズモン共鳴 (Surface Plasmon Resonance, SPR) と呼ぶ。SPR が発生すると入射光は金属界面に吸収される。本論文では金回折格子を用いた SPR のみを取り扱う。

金回折格子上で SPR が発生する条件としてプラズモンの界面接線方向の波数 k_{SPR} が回折光の界面接線方向の波数 k_x と一致する必要がある。それぞれの波数 k_{SPR}, k_x を数式で表現すると Eq. (2.2)、Eq. (2.3) として表現できる [59]。

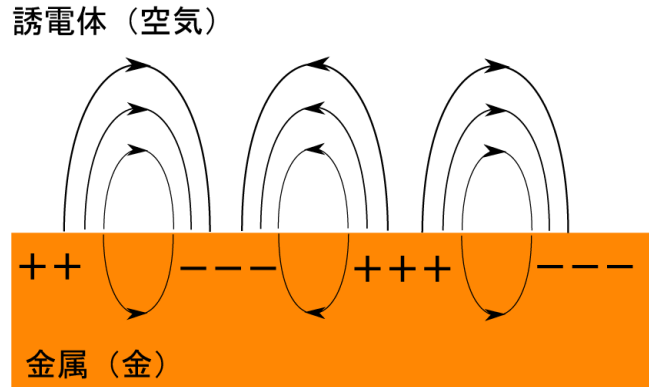


Fig.2.5: 表面プラズモン

$$k_{\text{SPR}} = k_0 \mathbf{Re} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_{\text{air}} \epsilon_{\text{Au}}}{\epsilon_{\text{air}} + \epsilon_{\text{Au}}}} \right) \quad (2.2)$$

$$k_x = k_0 \sqrt{\epsilon_{\text{air}}} \sin \theta + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.3)$$

Eq. (2.2)、Eq. (2.3) における各変数については以下のように定義する。

k_0 入射光の真空中での波数 [m^{-1}] ($k_0 = \frac{\omega}{c}$)

ω 入射光の振動数 [eV]

ϵ_{air} 空気の比誘電率: 1.00058986

ϵ_{Au} 金の比誘電率 (後述)

θ 入射角 [rad]

m 回折次数 (整数)

Λ 回折格子のピッチ [m]

それぞれの変数が金回折格子のどの部位に対応しているかについては Fig.2.6 に図示する。金の比誘電率 ϵ_{Au} は入射光の振動数 ω によって変化する。本論文では金の誘電率を以下 Eq. (2.4)、Eq. (2.5)、Eq. (2.6) から計算する [60]。

$$\hat{\epsilon}_r(\omega) = \hat{\epsilon}_r^{(f)}(\omega) + \hat{\epsilon}_r^{(b)}(\omega) \quad (2.4)$$

$$\hat{\epsilon}_r^{(f)} = 1 - \frac{f_0 \omega_p^2}{\omega(\omega - i\Gamma_0)} \quad (2.5)$$

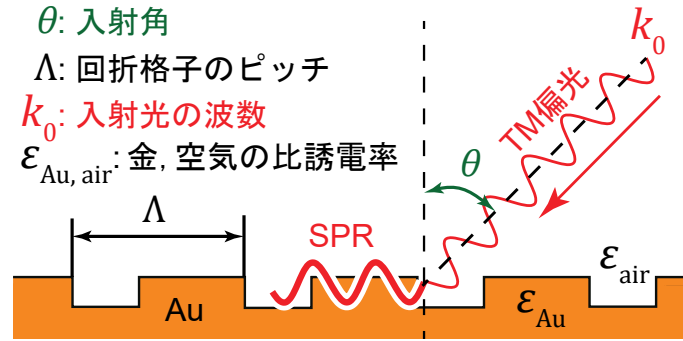


Fig.2.6: 金回折格子上的表面プラズモン共鳴における変数

$$\hat{\epsilon}_r^{(b)} = \sum_{j=1}^k \frac{f_j \omega_p^2}{(\omega_j^2 - \omega^2) + i\omega\Gamma_j} \quad (2.6)$$

それぞれの変数を以下のように定義する。

[eV] エレクトロンボルト: 1.6×10^{-19} [J]

h プランク定数: $6.626070040 \times 10^{-34}$ [Js]

\hbar デイラック定数: $\frac{h}{2\pi}$, $1.054571800 \times 10^{-34}$ [Js]

$\hbar\omega_p$ 金のプラズマ周波数: 9.0300 [eV]

f_j, ω_j, Γ_j フィッティングパラメータ (Table2.1 を参照)

Table2.1: フィッティングパラメータ [60]

	$j = 0$	1	2	3	4	5
f_j	0.7600	0.0240	0.0100	0.0710	0.6010	4.3840
ω_j		0.4150	0.8300	2.9690	4.3040	13.3200
Γ_j	0.0530	0.2410	0.3450	0.8700	2.4940	2.2140

以上の Eq. (2.2)、Eq. (2.3) と金の誘電率の計算式 Eq. (2.4)、Eq. (2.5)、Eq. (2.6) より SPR の発生角を表す式 Eq. (2.7) を導出できる。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\text{air}}}} \left(\text{Re} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_{\text{air}} \epsilon_{\text{Au}}}{\epsilon_{\text{air}} + \epsilon_{\text{Au}}}} \right) - m \frac{2\pi}{\Lambda k_0} \right) \right) \quad (2.7)$$

金の誘電率 ϵ_{Au} と真空中での入射光の波数 k_0 は入射光の振動数 ω の関数であるため、Eq. (2.7) を利用して SPR の発生する入射角を計算できる。ただし、回折次数は整数であるためそれぞれの次数に対して SPR 発生角が計算できることに注意が必要である。また、金属-空気間

の界面で SPR を発生させるためには空気の誘電率は正であるため、負の誘電率を持つ金属でなければならない [59]。この条件に合致する物質は主に金と銀があるが、銀は空気中の硫黄により硫化されて誘電率が経時変化するため大気中での計測には不向きである。したがって金属回折格子構造は金を採用した。

2.3 入射角走査時の光電流信号

この節では本研究の分光素子のカンチレバーを音圧で駆動して、金回折格子に光を入射した場合、光検出器が出力する光電流信号がどのような波形を示すのかについて述べる。まず、カンチレバーが共振し、金回折格子への入射角が周期的に変化する。例えば、Fig.2.2 では、 θ_1 から θ_3 までを周期的に走査することになる。

θ_1 から θ_3 までの間に Eq. (2.7) を満たす入射角が存在する場合、その入射角において金回折格子表面に入射光が吸収される。SPR によって発生した表面プラズモンは金回折格子と空気との界面を伝搬し、金内部へ吸収されるか、外部に光として放射されることにより減衰する [59]。表面プラズモンが金内部に吸収され、減衰していく過程でエネルギー準位の高い電子 (ホットエレクトロン) が生成される。このホットエレクトロンは金と n 型 Si との間にあるエネルギー障壁であるショットキー障壁によって光電流に変換される [58]。分光素子は n 型 Si に直接金回折格子を形成しているため、n 型 Si と Au との間にショットキー接合が存在している。よって、分光素子は SPR を特定の入射角で発生させると同時にその SPR を光電流により検知できる。本研究では入射光の光強度 [W] と特定の入射角における SPR がホットエレクトロンを生成し、それがショットキー障壁によって光電流 [A] に変換される割合が一定だと仮定して議論を進める。具体的にそれを数式によって表現すると Eq. (2.8) として表される。

$$R(\lambda_i, \theta_j) = \frac{I(\lambda_i, \theta_j)}{P_{\lambda_i}} \quad (2.8)$$

Eq. (2.8) における各変数は以下のように定義する。

P_{λ_i} 単色光 (波長 λ_i) の光強度 [W]

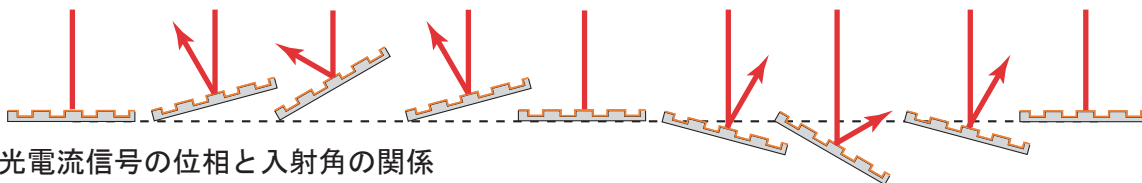
$I(\lambda_i, \theta_j)$ 光強度 P_{λ_i} を持つ単色光源を入射角 θ_j で入射したとき生じる光電流 [A]

$R(\lambda_i, \theta_j)$ 応答性 (λ_i と θ_j によって定まる定数)

ここでカンチレバーが共振時に単振動をすると考えると入射角は Fig.2.7 (a) のように変化する。この 0 から θ_{\max} まで入射角の走査とともに SPR によって光電流が発生している様子を表現した概念図が Fig.2.7 (b) である。Fig.2.7 (a) と Fig.2.7 (b) は上下の位置で対応している。一

定の光強度 P_{λ_1} をもつ単色光源を分光素子の金回折格子に入射したまま、入射角走査を行ったとき、金回折格子上の SPR はその単色光の波長 λ_1 に対応した入射角 θ_1 で発生する。また、 λ_2 を入射した時の光電流も示されている。このように、カンチレバーを共振させ、単色光を照射しながら角度を走査することで周期的な光電流信号が計測できる。

(a) カンチレバーが共振して入射角が変化している様子



(b) 光電流信号の位相と入射角の関係

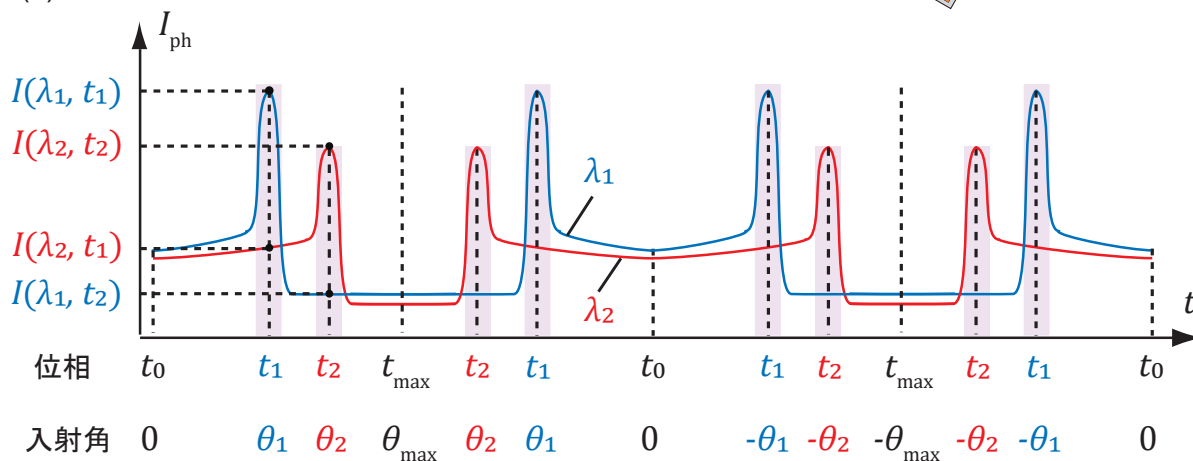


Fig.2.7: 入射角走査時の分光素子の挙動

光電流信号の周期性に着目して Fig.2.7 をみるとカンチレバーの単振動の半周期ごとに同じ波形が繰り返されている。これは入射角 $\theta = 0[\text{rad}]$ を起点に共振しているためであり、起点となる入射角を変更することで光電流信号の周期は変化する。この光電流信号の各時刻に着目して Fig.2.7 をみると、SPR 発生角に対応する光電流信号の位相 (1 周期内での時刻) が存在している。光電流信号の周期性は起点となる入射角と外力によって与える振動の周期によって変化するため、それらのパラメータを固定すれば、外力によって与える振動の位相と SPR 発生角が一対一対応することになる。つまり、本機構で分光を行う際は外力によって与える振動の位相と光電流信号との関係を得ることで分光に必要な情報である入射角と光電流信号との関係と等価な情報が得られる。

2.4 光電流信号を用いた分光

本論文で提案した機構から得られた光電流信号を用いて分光を行う方法について述べる。まず、入射角 θ_j で得られた光電流信号は Eq. (2.9) で表される。

$$I_{\theta_j} = \sum_{i=1}^n I(\lambda_i, \theta_j) \quad (2.9)$$

Eq. (2.9) は任意の角度 θ_j における光電流 I_{θ_j} は各波長の入射光によって得られている光電流の総和であるという意味である。ここで Eq. (2.8) を利用すると Eq. (2.10) が導かれる。

$$I_{\theta_j} = \sum_{i=1}^n R(\lambda_i, \theta_j) P_{\lambda_i} \quad (2.10)$$

また、2.3 節で議論した入射角 θ_j と光電流信号の一周期内での位相 t_j が一対一対応することを考えると Eq. (2.11) が導出できる。

$$I_{t_j} = \sum_{i=1}^n R(\lambda_i, t_j) P_{\lambda_i} \quad (2.11)$$

ここで観測する位相と波長を離散化して ($1 \leq j \leq n$) の範囲で考えて総和を展開すれば Eq. (2.12) を導くことができる。

$$\begin{aligned} I_{t_1} &= R(\lambda_1, t_1)P_{\lambda_1} + R(\lambda_2, t_1)P_{\lambda_2} + \cdots + R(\lambda_n, t_1)P_{\lambda_n} \\ I_{t_2} &= R(\lambda_1, t_2)P_{\lambda_1} + R(\lambda_2, t_2)P_{\lambda_2} + \cdots + R(\lambda_n, t_2)P_{\lambda_n} \\ &\vdots \\ I_{t_n} &= R(\lambda_1, t_n)P_{\lambda_1} + R(\lambda_2, t_n)P_{\lambda_2} + \cdots + R(\lambda_n, t_n)P_{\lambda_n} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Eq. (2.12) から行列式を得ることが出来る。

$$\begin{bmatrix} I_{t_1} \\ I_{t_2} \\ \vdots \\ I_{t_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\lambda_1 t_1} & R_{\lambda_2 t_1} & \cdots & R_{\lambda_n t_1} \\ R_{\lambda_1 t_2} & R_{\lambda_2 t_2} & \cdots & R_{\lambda_n t_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{\lambda_1 t_n} & R_{\lambda_2 t_n} & \cdots & R_{\lambda_n t_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\lambda_1} \\ P_{\lambda_2} \\ \vdots \\ P_{\lambda_n} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

それぞれ光電流信号のベクトルを \mathbf{I} 、応答性の行列を \mathbf{R} 、光強度のベクトルを \mathbf{P} とおくと Eq. (2.14) が導かれて、最終的に各位相 t_j における光電流信号と応答性の行列さえわかれば応

答性行列の逆行列を計算することで光強度のベクトル、つまり入射光のスペクトルを得ることができる。

$$\begin{aligned}\mathbf{I} &= \mathbf{R}\mathbf{P} \\ \mathbf{P} &= \mathbf{R}^{-1}\mathbf{I}\end{aligned}\tag{2.14}$$

Eq. (2.8) より、分光素子に光強度 P_{λ_i} をもつ単色光源を入射し、各位相 t_j での光電流を計測することで $R(\lambda_i, \theta_j)$ が計算できることがわかるため事前に応答性行列 \mathbf{R} を得ておけば、Eq. (2.14) を利用して入射スペクトルを計算できる。

第 3 章

分光素子の設計及び製作

この章では本研究で提案する分光素子の設計及び製作について述べる。まず 3.1 節で分光素子の設計について述べ、3.5 節以降で分光素子の製作について述べる。

3.1 分光素子の設計

本研究の分光素子の設計について述べる。まず、本研究は金回折格子型プラズモニック光検出器を用いた分光がオンチップ上で可能か検証することを目的としている。プラズモニック光検出器を利用した分光には金回折格子への入射角を走査する機構のオンチップ化が必要であり、本節ではこの角度走査機構を主眼においた分光素子の設計について述べる。本研究の分光素子は第 2 章でも述べたように素子が出力する光電流信号を入射角ごとに計測して分光を行うため、分光素子は以下の仕様を満たす必要がある。

仕様

1. 金回折格子型プラズモニック光検出器を搭載し、光検出器が出力する光電流信号をオシロスコープなどの外部機器へ出力可能な配線・端子を持つ
2. 金回折格子への入射角を走査可能な機構を持つ
3. 2 つの単色光を分光する時、光検出器の入射角特性のピークがその半値幅 [deg] 以上離れていない場合、2 つの単色光を区別できない。したがって、分光が可能か検証する場合、入射角の走査範囲はその半値幅の少なくとも 2 倍以上必要である

また、金回折格子型プラズモニック光検出器を用いた分光はすでに大型回転ステージ上において陳らの研究（文献 [40,61]）で実証されており、本研究ではその金回折格子の寸法を踏襲する。光検出器の入射角特性の半値幅は文献 [40] においては約 2 [deg] であったため、少なく

とも 4 [deg] 以上の範囲を角度走査可能な構造を設計する必要がある。また、2.1 節でも述べたが、金回折格子自体の構造が変形して発生する光検出特性の変化は純粹に角度走査のみを反映しないため、検証が複雑化してしまう。そこで、本研究では金回折格子の構造が変形しないようにそれ以外部分の剛性が低くなるようにカンチレバーの構造を設計した。

まず金回折格子の形状について述べる。金回折格子の各寸法は Fig.3.1(a) の通りに、金膜の厚さ t_{Au} 、回折格子の溝の深さ d 、回折格子のピッチ Λ で示される。具体的には、金膜の厚さ $t_{Au} = 100$ [nm]、回折格子の溝の深さ $d = 100$ [nm]、回折格子のピッチ $\Lambda = 3.4$ [μm] である。金回折格子上での SPR の挙動が回折格子のピッチに依存することは第 2 章でも述べたが、金膜の厚さや回折格子の溝の深さにも依存するこ

とがシミュレーションで明らかになっている [61]。具体的には有効な金膜の厚さ*4は 60~100 [nm] で回折格子の溝の深さ*5は 60~120 [nm] である。金を採用した理由については第 2 章でも述べられている通り、金が負の誘電率を持ち、その他の負の誘電率をもつ物質 (銀等) より化学的に安定な性質をもっているためである。

分光素子のカンチレバーは、金回折格子を形成する正方形の板と、それを支持する 2 つの蛇腹状の足から構成した (Fig.3.1(b))。この構成により、脚部のみ剛性が低下し、金回折格子がある正方形の板部の変形を抑制できる。この構成については磯崎らの研究 [62] から着想を得ている。磯崎らはカンチレバーの形状を二本足かつ蛇腹状にし、カンチレバーの長さ 55 [μm] に対し 5.44 [μm] (約 ± 5.9 [deg] の角度走査に相当) の変位に耐えうるカンチレバーを製作していた [62]。これより、少なくとも同一形状のカンチレバー上に金回折格子を形成できれば仕様 3 (4 [deg] の範囲で角度走査が可能) を満たすことができる。本研究では静電駆動による影響を除外するためにカンチレバーには静電アクチュエータのような内部動力は実装せず、音圧によりカンチレバーを共振させ、角度変化を得る。本研究ではスピーカを用いて、音圧をカンチレバーに供給した。

分光素子のカンチレバーは n 型 Si で構成されており、金回折格子とショットキー接合し、

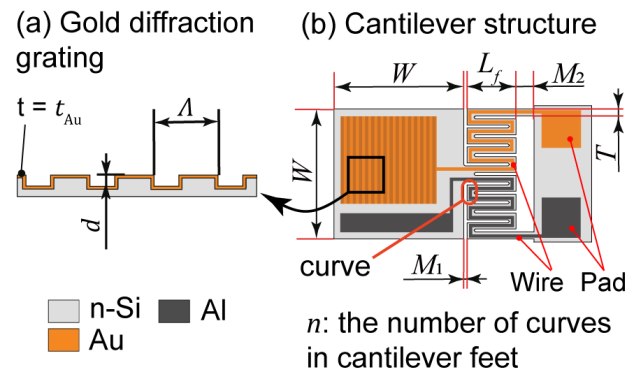


Fig.3.1: 金回折格子およびカンチレバーの寸法

*4 [61] Figure 3.8

*5 [61] Figure 3.7

アルミニウム電極とはオーミック接合をする。使用した n 型 Si の抵抗値は $1\sim 20 [\Omega \cdot \text{cm}]$ であった [40]。また、金とアルミニウムそれぞれの電極を別々の足を通して配線することで配線がショートする可能性や得られる光電流信号にノイズが入り込む可能性を少なくした。それぞれの配線の太さは $50 [\mu\text{m}]$ 以上とした。Fig.3.1(b) の通りに配線を伸ばした先にはワイヤボンディング用のパッドを用意した。このパッドから金回折格子が出力する光電流信号を外部機器で計測可能であり、これは仕様 1 を満たす。

3.2 カンチレバーの寸法の決定

前節 (3.1 節) では分光素子のカンチレバーの概形 (Fig.3.1) を決定したが、各寸法については決定していなかった。そこで本節では、分光素子のカンチレバーの各寸法を決定する。まず、本研究は金回折格子型プラズモニック光検出器を用いた分光がオンチップ上で可能か検証することを目的としているのであった。検証にあたって想定できる問題として以下のものが挙げられる。

1. 分光素子が出力する信号を計測する外部機器の時間分解能もしくは帯域幅が不足する。カンチレバーの共振周波数が過度に大きい場合に発生する可能性がある。そもそも、陳らの検証 [40] では角度ごとに停止させて、分光素子の応答を計測しており、分光機能の検証のためにはその状況に近い方が都合がよい。
2. 平板部が小さすぎ、金回折格子のみに光を照射できない。アルミニウム電極に光が入射した場合、通常の光電流とは逆方向の電流が発生し、ノイズの原因となる。

したがって、本研究での検証に適したカンチレバーはより低い共振周波数を持ち、平板部がレーザーのスポット径 (直径 $1\sim 4 [\text{mm}]$) より大きい構造であることがわかる。さらに、カンチレバーとして自重を支えるだけでなく、MEMS 構造として実際に製作可能でなければならない。そこで、まずはカンチレバー構造のみを実際に製作し、最終的に欠損なく製作できた構造の中でもっとも共振周波数が低い寸法を採用する。

カンチレバーの各寸法は Fig.3.1(b) の通りに、正方形の一辺の長さ W 、カンチレバーの足の長さ L_f 、カンチレバーの足の太さ T 、カンチレバーの足のカーブの個数 n 、正方形部分とのマージン M_1 、外枠とのマージン M_2 となっている。具体的には正方形の一辺の長さ W を $2 [\text{mm}]$ 、外枠や正方形部分とのマージン $M = M_1 = M_2$ を $50 [\mu\text{m}]$ に固定し、カンチレバーの足の長さ L_f を 550 もしくは $750 [\mu\text{m}]$ 、カンチレバーの足の太さ T を 100 もしくは $150 [\mu\text{m}]$ 、カンチレバーの足のカーブの個数 n を 5 、 9 もしくは 13 個の 3 つのパラメーターについて全

部の組み合わせ ($2 \times 2 \times 3 = 12$) を製作する。すべての組み合わせについて一枚のウエハに形成するためのフォトリソグラフィ用のマスクとしてマスク (Fig.3.2) を製作した。

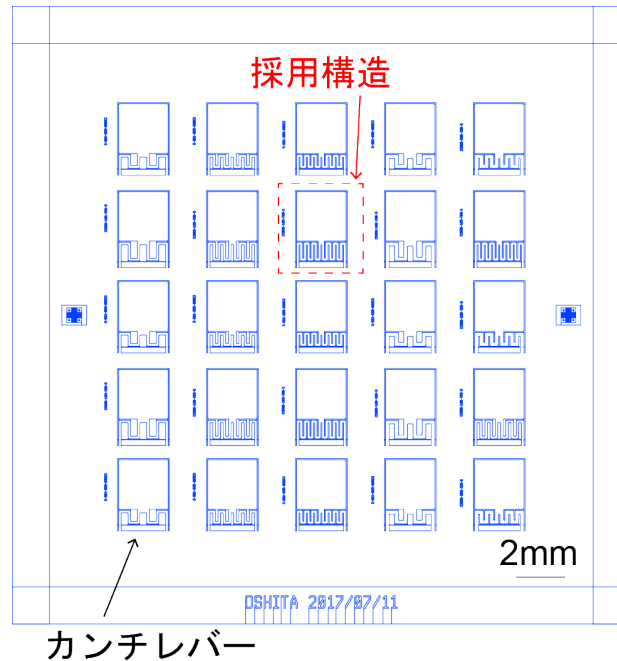


Fig.3.2: 機械的構造探索用マスク

このマスクを利用し、ウエハ上に様々な寸法をもつカンチレバーを形成した最終的にこれらのカンチレバーはすべて欠損なく製作できた。製作したカンチレバー群についてレーザードップラ振動計 (MLD-221D, Neoarc Corp., Japan) を用いて共振周波数を測定した。カンチレバーを形成したウエハはピエゾアクチュエータ (Tokin Corporation, AE1414D16, Japan) に取り付けられ、面外方向の外部振動が加えられるようにした。カンチレバーの先端にレーザードップラ振動計からのレーザースポットを当てながら、20~4000 [Hz] の強制振動をピエゾアクチュエータから与えた。カンチレバー周辺の剛体基板に対する振幅のゲインプロットを求めた結果について、共振周波数が低い順に4つ Fig.3.3 に示す。

なお、凡例に示されている数字はそれぞれカンチレバーの足の長さ L_f -カンチレバーの足の太さ T -カンチレバーの足のカーブの個数 n と対応している。Fig.3.3 の結果から、それぞれ L_f - T - $n = 550$ - 100 - 13 の時に 1330 [Hz]、 550 - 100 - 5 の時に 1660 [Hz]、 550 - 150 - 9 の時に 1970 [Hz]、 750 - 100 - 13 の時に 1070 [Hz] の周波数で共振することがわかった。すなわち、 750 - 100 - 13 の寸法の組み合わせはこの中で最も共振周波数の低く、使用したマスク (Fig.3.2) の中でもっとも本研究の目的に合致する寸法の組み合わせである。したがって、この段階においてはカンチレバーの各寸法については、正方形の一辺の長さ $W = 2$ [mm]、カンチレバーの足の長さ $L_f = 750$ [μm]、カンチレバーの足の太さ $T = 100$ [μm]、カンチレバーの足のカー

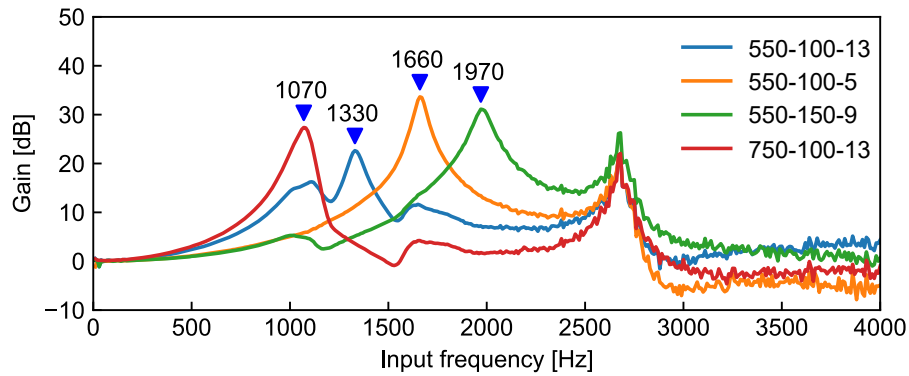


Fig.3.3: レーザードップラ振動計による共振周波数の測定結果

ブの個数 $n = 13$ 個、外枠や正方形部分とのマージン $M = 50$ [μm]、と与えた。次にこの寸法のカンチレバーに対して 1.25 倍に拡大したカンチレバーを Fig.3.4 に示すマスクを用いて行ったところ実際に欠損なく製作できた。最終的に本研究ではカンチレバーの各寸法については、正方形の一辺の長さ $W = 2.5$ [mm]、カンチレバーの足の長さ $L_f = 937$ [μm]、カンチレバーの足の太さ $T = 125$ [μm]、カンチレバーの足のカーブの個数 $n = 13$ 個、正方形部分とのマージン $M_1 = 64$ [μm]、外枠とのマージン $M_2 = 350$ [μm] と決定した。

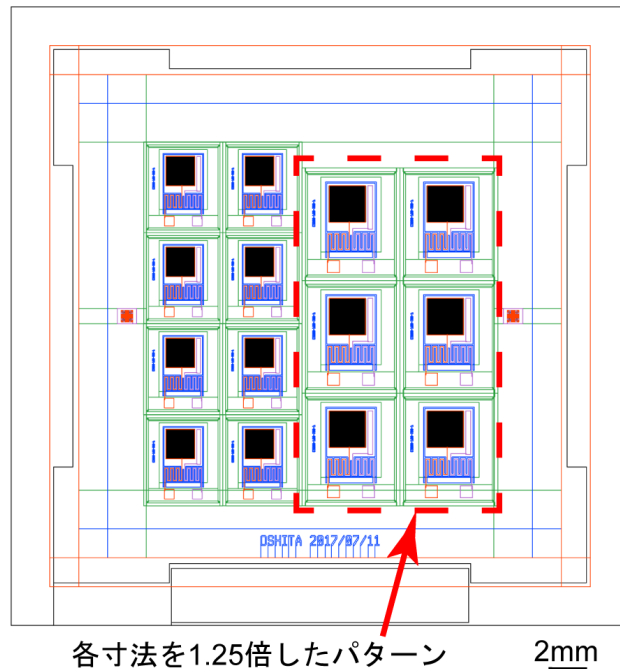


Fig.3.4: 製造可能性検証用マスク

3.3 有限要素法による共振周波数の計算

3.2 節で寸法を決定したカンチレバーの共振周波数を求めるために有限要素法 (COMSOL Multiphysics ver 5.3, MEMS module) によるシミュレーションを行った。その結果、Fig.3.5 の通り、1 次モードは 391 [Hz]、2 次モードは 1681 [Hz] となった。Fig.3.5 に示す通りに、各モードにおいてカンチレバーは赤線の軸回りに角度変化をすることがわかる。1 次モードの変形をピッチ方向の角度変化とすると、2 次モードの変形はロール方向の角度変化となる。先行研究 [40] では回転ステージ上で一定角度ごとに停止しながら計測を行っており、本研究のカンチレバーを利用した計測とは一定の入射角にとどまる時間が異なる。実験に使用する振動モードは可能な限り共振周波数の低いモード (1 次モード) を用いることでこの差異を少なくする。

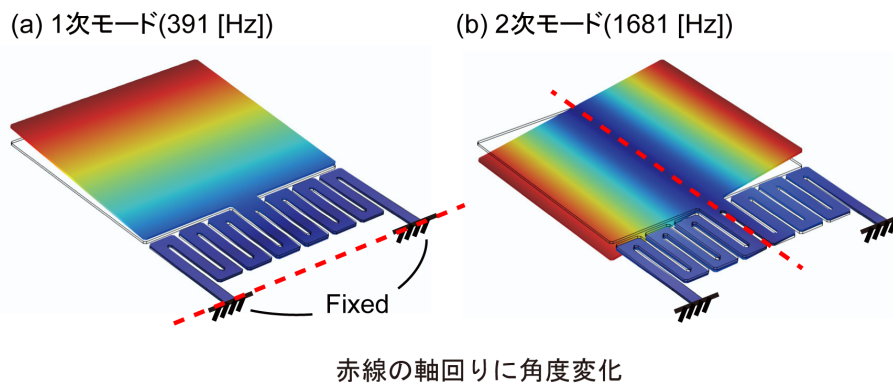


Fig.3.5: カンチレバーの有限要素法によるシミュレーション

3.4 構造変形時の受光部の曲率

分光素子のカンチレバーの脚部を蛇腹状にした狙いとして、受光部である平板部の変形を抑制する目的がある。本節ではこの構造上の工夫により、平板部に変形が発生しているか否かを有限要素法によるシミュレーション (COMSOL Multiphysics ver 5.3, MEMS module) によって検証した結果について述べる。Fig.3.6(a) は、共振振動時のカンチレバーの根元から先端までの断面形状を示したものである。また、Fig.3.6(b) の左上に、カンチレバー上の断面線の位置を示す。Fig.3.6(a) の 0 [μm] から 1280 [μm] までの領域がカンチレバーの脚部に相当する。また、1280 [μm] 付近の線の空白は、カンチレバーの脚部とカンチレバー本体との間の隙間に相当する。そして、残りの部分は、カンチレバーの平板部に対応している。Fig.3.6(a) では、ほぼすべての曲げが脚部で行われており、平板部の断面は直線的で、曲がっていないことがわ

かる。次に、平板部が定量的に曲がっているか否かを調査するために、平板部の曲率を計算した。計算結果を Fig.3.6(c) に示す。グラフの最初と最後にノイズ様の値が含まれているが、この領域に相当する部分は金回折格子を形成していない領域である。さらにこの最初と最後の部分を除けば、曲率はほぼ0であり、曲率半径の平均値は約 2.5 [km] であった。したがって、回折格子の 1 周期 (3.4 [μm]) あたりで発生しうる変形量を、円弧の半径を 2.5 [km]、弦長を 3.4 [μm] とした場合の矢高とみなすと、約 2.3 [fm] と概算できる。平板部が曲がることで変形しうる寸法として、回折格子の周期 (3.4 [μm])、溝の高さ (100 [nm]) が挙げられるが、これらの寸法と比較して変形量は十分小さく無視できるオーダーである。

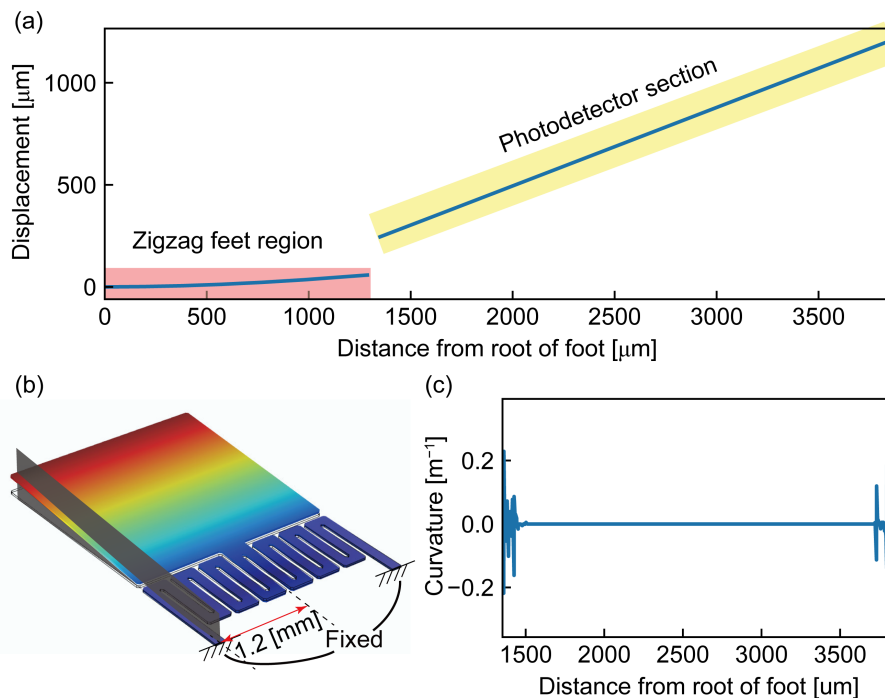


Fig.3.6: カンチレバーの共振時における変形のシミュレーション (a) カンチレバーの変位を (b) 断面に沿ってプロットしたもの. (c) 変位の曲率

3.5 分光素子の製作の概要

本節では 3.1 節 ~3.4 節 で設計した分光素子の製作概要について述べる。まず、本研究の製作工程は Fig.3.7 に示される通り、大きく 4 つの段階 (回折格子の形成・金属の蒸着と成形・カンチレバーの成形・カンチレバーを固定する層の除去) に分けられる。このそれぞれの段階を各節で説明していく。3.7 節では、Fig.3.7(1) にあたる回折格子の形成について述べる。3.8 節では、Fig.3.7(2) にあたる金・アルミニウムの蒸着と電極及び配線の形成について述べる。3.13 節では、Fig.3.7(3) にあたる Deep Reactive Ion Etching(DRIE) によるカンチレバーの形成について述べる。最後に 3.14 節では、Fig.3.7(4) にあたるカンチレバーを固定する SiO_2 の層を除去するフッ酸蒸気エッチングの工程について述べる。また、追加でフォトマスクの製作方法を 3.6 節、PCB 基板への実装を 3.15 節で述べる。

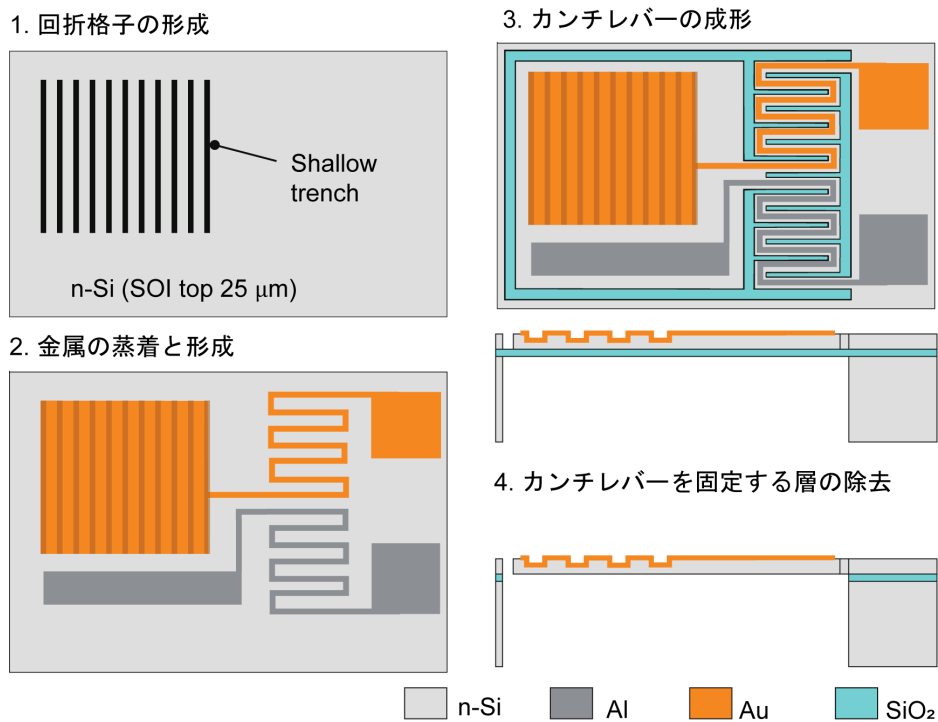


Fig.3.7: 分光素子の製作工程

本研究では、Silicon On Insulator(SOI) ウェハを用いて、分光素子を製作した。SOI ウェハは Fig.3.8 に示すとおり、デバイス層、ボックス層、ハンドル層からなっており、ボックス層 (SiO_2) を他の層で挟む形になっている。本研究では SOI の各層についてデバイス層が 25 $[\mu\text{m}]$ 、ボックス層が 1.5 $[\mu\text{m}]$ 、ハンドル層が 625 $[\mu\text{m}]$ のものを用いた。なお、本研究で使用する SOI ウェハはすべて 1 インチ四方に分割したものを使用した。

デバイス層 (n 型 Si) の抵抗率は 3.1 節で述べたように、抵抗率が 1~20 $[\Omega \cdot \text{cm}]$ のものを使用した。次に回折格子の形成について述べる。まずはポジ型フォトレジストをフォトリソグラフィにより回折格子の形状に形成した。このフォトレジストの形成によって Si がむき出しになっている部分とそうでない部分が形成される。この状態で Reactive Ion Etching(RIE) を行うと、

Si がむき出しになっている部分がエッチングされ、最終的に溝が形成した。(Fig.3.7(1))。この操作により、デバイス層上には約 100 $[\text{nm}]$ の深さ・3.4 $[\mu\text{m}]$ の周期を持つ回折格子を形成できる。形成した回折格子の全面を覆うように厚さ 100 $[\text{nm}]$ の金を斜めから格子を回転させつつ蒸着し、その上にフォトレジストを成形した。金を溶解する溶液(金エッチャント)にウェハを浸すことでレジストによって保護されていない部分の金が溶解し、金回折格子及び電極が形成できる (Fig.3.7(2))。次にカソード電極としてアルミニウム電極を金と同様にフォトレジストを用いて形成した。デバイス層およびハンドル層の不要な部分を DRIE によって除去 (Fig.3.7(3)) することで、設計した形状のカンチレバーを形成した。DRIE による Si のエッチングはボックス層で停止するため、設計通りの膜厚をもつ Si カンチレバーを形成できる。最終的にカンチレバーを固定していたボックス層をフッ酸蒸気エッチングにより取り除くことによって、カンチレバーを開放した (Fig.3.7(4))。上記の工程で製作した分光素子の写真を (Fig.3.9(a)) に示す。また、金回折格子表面を Scanning Electron Microscope(SEM) により撮像した写真を (Fig.3.9(b)) に示す。寸法通りに金回折格子が形成されていることがわかる。



Fig.3.8: SOI ウェハの構造

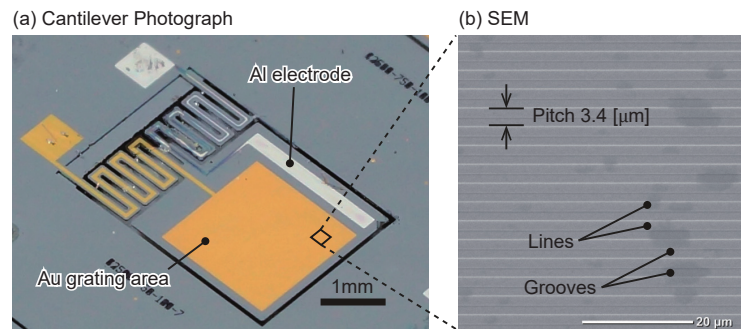


Fig.3.9: 分光素子の写真

3.6 使用したフォトマスク

本研究で使用したフォトマスクについて述べる。まず、フォトマスクはフォトリソグラフィにおいて使用するものであり、フォトマスクを使用することで微細な領域に限定して光を照射できる。フォトレジストを部分的に感光することで、フォトレジストを任意の形状に加工できる。本研究で使用するフォトマスクはクロムによりパターンを形成することで製作されており、クロムにより光を遮断することで微細な領域に限定して光を照射できる構造になっている。フォトマスクは全部で5枚存在しており (Fig.3.10)、Fig.3.10(a) は回折格子の形成、Fig.3.10(c) は金の成形、Fig.3.10(d) はアルミニウムの成形、Fig.3.10(e) はデバイス層側からのカンチレバーの形成 (表掘り)、Fig.3.10(f) はハンドル層側からのカンチレバーの形成 (裏掘り) で使用した。

また、Fig.3.10(a) をみると黒色の四角いパターンのみが写っており $\Lambda = 3.4 [\mu\text{m}]$ の回折格子が確認できないが、拡大図 (Fig.3.10(b)) を見ると回折格子状のパターンを確認できる。カンチレバーを形成するフォトマスク (Fig.3.10(e)) の各寸法は 3.2 節で決定した寸法を用いた。Fig.3.10 のパターンをすべて重ね合わせたものを Fig.3.11 に示す。Fig.3.11 では、カンチレバー及び各電極の位置が整合していることがわかる。

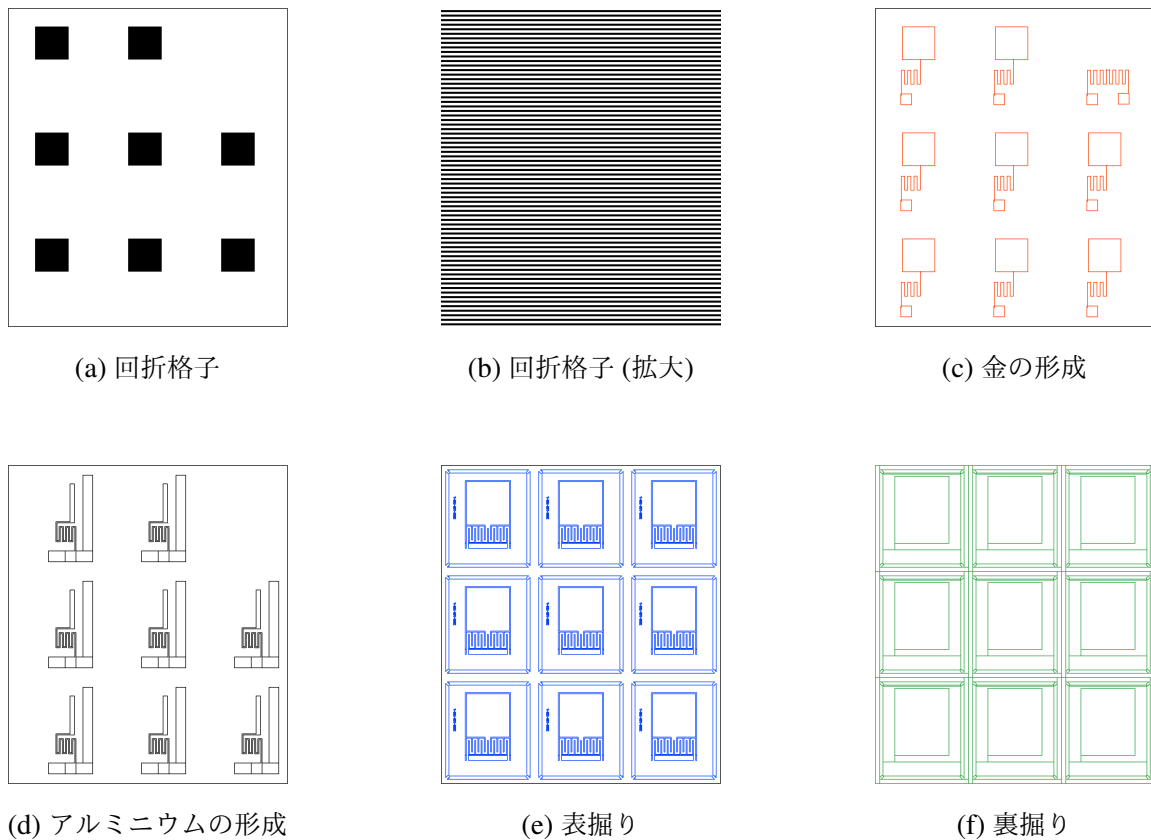


Fig.3.10: 本研究の分光素子の製作に使用したフォトマスク

3.7 反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching, RIE) による回折格子の形成

この節では回折格子を SOI ウエハのデバイス層に形成する段階について述べる。回折格子は 3.1 節でも述べた通り、約 100 [nm] の深さと 3.4 [μm] のピッチをもつ必要がある。3.5 節の概要で述べたとおりにレジストで回折格子を形成し、Si を RIE でエッチングして形成する場合、回折格子の深さについて設計通りになるようにプロセス条件を調整する必要がある。ここでは RIE で Si をエッチングするガスである SF_6 を流す時間を調整して、回折格子の深さを調整した。この段階の製作工程について以下で詳細に述べる。まず流水洗浄した SOI ウエハのデバイス層を上にして、デバイス上の水分を取り除くために 110 [$^{\circ}\text{C}$] のオーブンで 3 [min] 程度熱した。オーブンから SOI ウエハを取り出した後、数 [s] エアブローし、デバイス層を上にしてスピコートに設置した。フォトレジストである OFPR800-23cp を SOI ウエハのデバイス層表面に万遍なく滴下し、30 [s] の間、4000 [rpm] の回転数で回転させた。次にオーブン

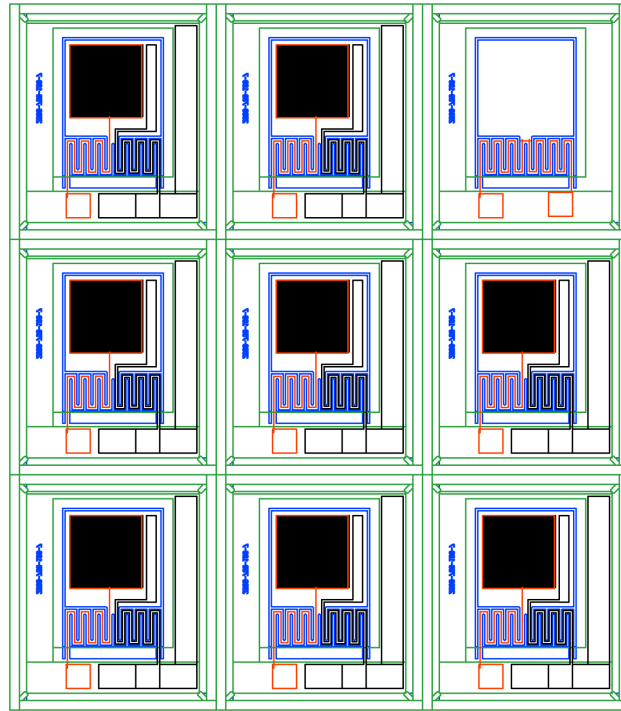
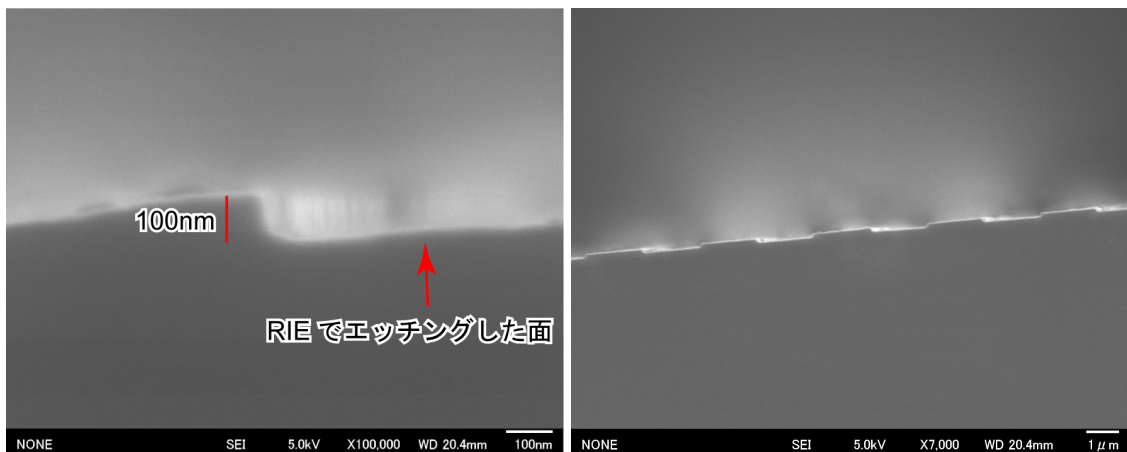


Fig.3.11: Fig.3.10 のフォトマスクを重ね合わせた図

で 2 [min] の間、110 [°C] で熱した。SOI ウエハのデバイス層にパターン (Fig.3.10(a)) を 3 [s] 露光した。露光量は 17 [mW/cm²] であった。露光した SOI ウエハは現像液である NMD-3 によって現像した。現像は約 1 [min] で完了し、レジストが正常に形成されていることを顕微鏡で確認した。次に、SOI ウエハのデバイス層を上にしてコンパクトエッチャで 30 [s] O₂ アッシングした。アッシングとは、レジストを燃焼させて灰化する処理で、顕微鏡で確認できない現像されるべきレジストを除去する操作である。コンパクトエッチャによる O₂ アッシングはデバイス層の Si を酸化して SiO₂ にする働きがある。SiO₂ は RIE による Si エッチングの精度を低下させる恐れがあるため、レジストにダメージを与えずに SiO₂ をエッチングできる Buffered HF(BHF) に 2 [min]、SOI ウエハを漬けて SiO₂ を除去した。次に RIE により SF₆ を 4 [s] 反応させることで 100 [nm] の回折格子を形成した。次にレジストを除去するためにアセトンに SOI ウエハを漬けて、超音波洗浄機内で 10 [min] 超音波洗浄した。次に、アセトンでも除去しきれなかったレジストを除去するために SOI ウエハのデバイス層を上にしてコンパクトエッチャで 30 [s] O₂ アッシングした。O₂ アッシングした後は、SOI ウエハを HF に 2 [min] 漬けることで O₂ アッシングにより生じた SiO₂ を除去した。この時、ウエハ表面に撥水性があることを確認し、親水性の SiO₂ が除去できたことを確認した。デバイス層の撥水性の有無の判断方法は 3.11 節項で述べる。その後、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) で回折格子の溝がどの程度の深さになっているか確認した。形成した回折格子の例とし

て、RIE で SF_6 を 4 [s] 反応させたものを Fig.3.12(a) に示す。この像は、RIE した後チップを割り、回折格子が形成された側面を上側にして治具に固定し、SEM で撮像した。SEM の像を確認すると深さ約 100 [nm] の溝が確認できる。別の倍率の像を Fig.3.12(b) に示す。周期的に溝が形成されており、回折格子が形成されていることが確認できる。次に回折格子の表面形状を走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscope, SPM) で計測した図を Fig.3.13 に示す。Fig.3.13 を確認すると周期的に溝が形成されており、回折格子が形成されていることが確認できる。Fig.3.13 に示されている赤い矢印に沿って断面を表示した図が Fig.3.14 である。Fig.3.14 では回折格子の周期が 3.4 [μm]、高低差が約 120 [nm] となっており、概ね 3.1 節で述べた設計に沿うものが形成されることがわかる。この結果では設計から約 20 [nm] の誤差が発生していることがわかるが、文献 [61] のシミュレーションの結果では 120 [nm] の場合でも金回折格子上で SPR が発生することが示されており、本研究の目的であるオンチップ上での分光機能の検証において、この回折格子は十分に用いることができると考えられる。したがって、本研究では回折格子を形成する工程で SF_6 を 4 [s] 流す条件を用いた。



(a) 回折格子を側面から撮像した SEM 図 (倍率: 10000 倍) (b) 回折格子を側面から撮像した SEM 図 (倍率: 7000 倍)

Fig.3.12: 回折格子を側面から撮像した SEM 図

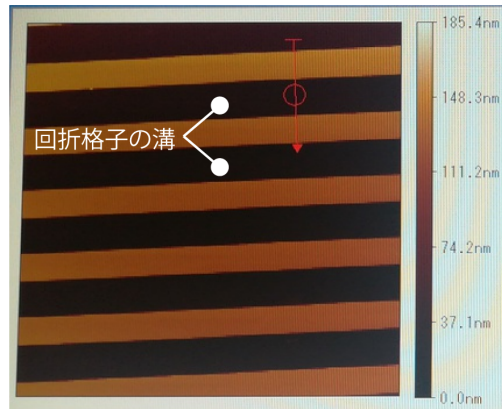


Fig.3.13: 回折格子表面の SPM 図 (2次元マッピング)

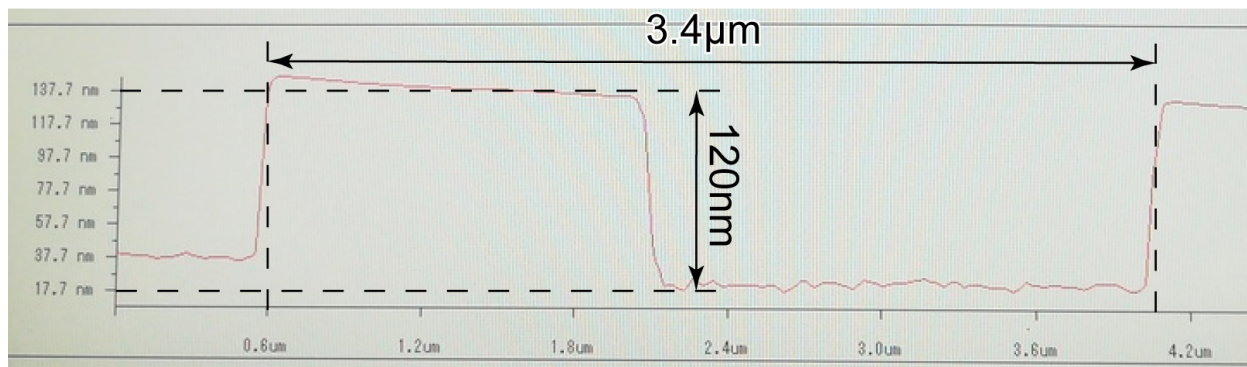


Fig.3.14: 回折格子表面の SPM 図 (1次元マッピング)

3.8 金・アルミニウムの蒸着と成形

この節では金とアルミニウムをデバイス層に蒸着し、設計した形状に成形する段階について述べる。まず、金については3.1節で述べたように、金の膜厚で金回折格子型光検出器の入射角特性が変化する。本研究では金の膜厚の目標値を 100 ± 50 [nm] と設計した。金は抵抗加熱式蒸着器 (SVC-700TMSG/7PS80, サンヨー電子) によって蒸着され、形成される膜厚は蒸着器に与える金の質量で決まるため、本研究ではこの蒸着器に与える金の質量を調節し、膜厚を調整した。この段階の製作工程について以下で詳細に述べる。本工程では3.7節で述べられている製作工程を完了した SOI ウエハを使用した。まず、デバイス層表面にある自然酸化膜 (SiO_2) の層を SOI ウエハを HF に 2 [min] 漬けることで除去した。自然酸化膜は金と n 型 Si との間に存在するとショットキー接合の形成を阻害するため除去する必要がある。自然酸化膜は Si の面が空気と接触するだけで形成されるため、この段階で撥水性を確認した。自然酸化膜の有無は Si 表面が撥水性を持つか否かで判断でき、撥水性を持たない場合それは Si の面

が露出していないことを意味する。デバイス層の撥水性の有無の判断方法は 3.11 節で詳細に述べる。次に抵抗加熱式蒸着装置でデバイス層の表面に 20 [deg] 斜めから金を回転蒸着した。タングステンワイヤに金を取り付け、真空度が 10^{-3} [Pa] 以下になったところで電流を流して加熱し、金を蒸発させる。この抵抗加熱式蒸着器には膜厚計が搭載されていないため、タングステンワイヤに取り付ける金の質量によって膜厚を調整した。複数の金の質量とそれによって蒸着された膜の厚さを Fig.3.15 に示す。Fig.3.15 を見ると金の質量 0.09 [g] 付近においては 11 [nm/mg] の蒸着レートが得られていることがわかる。本研究では約 0.089 [g] となるように金のワイヤ蒸着器に設置し、約 145 [nm] の膜厚を形成する条件を採用した。

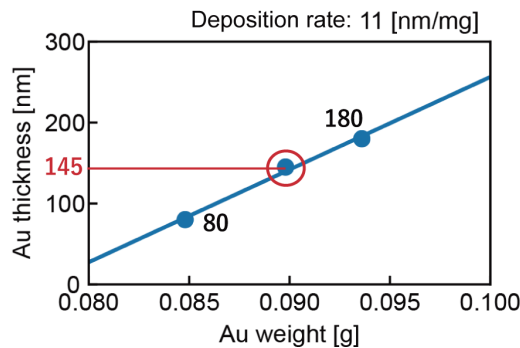


Fig.3.15: 真空蒸着器に乗せる金の質量と蒸着される金の膜厚の関係

3.7 節と同様にフォトリソトである OFPR800-23cp をフォトマスク (Fig.3.10(c)) を用いて設計した形状に形成した。レジスト現像後、SOI ウエハのデバイス層を上にしてコンパクトエッチャで 30 [s] O_2 アッシングした。これは、顕微鏡で確認できない現像されるべきレジストを除去し、正確な金の形成に資する狙いがある。その後、金を溶解する金エッチャントに SOI ウエハを漬けて金をエッチングした。エッチングの進み具合を確認しながら、エッチングが不均一にならないようにシャーレを攪拌した。約 1 [min] 程度で金がエッチングされるので、顕微鏡で Fig.3.16 のような黄色で示される金のエッチングが不足している部分がないか確認し、この部分がなくなるまでエッチングを継続した。

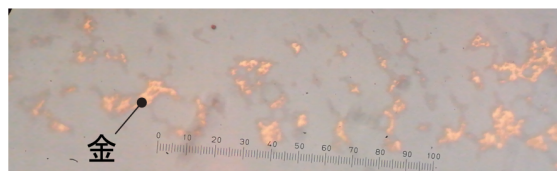


Fig.3.16: 金のエッチングが不足している部分

次にレジストを除去するためにアセトンに SOI ウエハを 10 [min] 漬けた。この時、超音波洗浄は金が Si から剥離してしまうため行わなかった。次に、SOI ウエハのデバイス層を上

してコンパクトエッチャで 30 [s] O_2 アッシングした後に、SOI ウエハを HF に 2 [min] 漬けた。その後、SOI ウエハのデバイス層表面が Fig.3.22 のように撥水性をもっていることを確認した。デバイス層の撥水性の有無の判断方法は 3.11 節で述べる。

次に、アルミニウムの蒸着と成形を行った。アルミニウムは n 型 Si とオーミック接合を形成すればよいため、金のように膜厚の制御は必要ない。ただし、前述の金エッチングの工程でエッチングが不十分であった場合、結局界面には金によってショットキー障壁が形成されるため電流が流れなくなってしまう。また、自然酸化膜が残留している場合も同様であり、アルミニウムの蒸着には自然酸化膜及び金の残留に留意する必要がある。この段階の製作工程については以下のプロセス条件を導出するために予備実験を行った。この予備実験の詳細については 3.9 節、3.10 節で述べる。この段階の製作工程について以下で詳細に述べる。ネガ型フォトリソである ZPN1150-90 を SOI ウエハのデバイス層表面に万遍なく滴下し、30 [s]、3000 [rpm] で回転させて 90 [°C] のオーブンで 90 [s] 熱した。次に、マスクアライナーでレジストにパターン (Fig.3.10 (d)) を露光量が 177 [mJ/cm²] となるように露光した。通常の ZPN1150-90 の露光量は 118 [mJ/cm²] だが、このように過剰に露光することで逆テーパ型が形成され (Fig.3.20(b))、リフトオフに適した形状になる。露光が完了したら、110 [°C] のオーブンで 60 [s] 熱した。その後 SOI ウエハを現像液の NMD-3 によって 90 [s] 現像した。現像の際にはレジストの部分ごとのエッチングレートを均一にするために 10 [s] ごとに攪拌する回転方向を変更した。現像後に撮影した SOI ウエハを Fig.3.17 に示す。その後、SOI ウエハのデバイス層を上にしてコンパクトエッチャで 30 [s] O_2 アッシングした。 O_2 アッシングした後は、SOI ウエハを BHF に 2 [min] つけて、撥水性を持たなかった場合、金エッチャントに 2 [min] 漬けるプロセスを繰り返す。

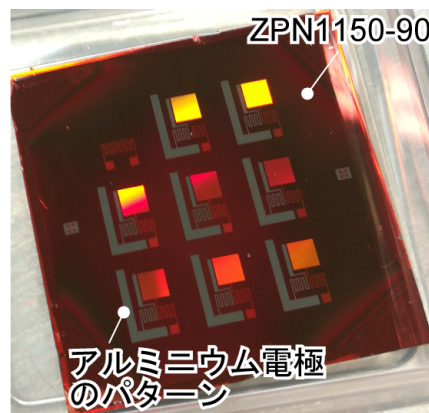


Fig.3.17: ネガ型フォトリソの ZPN1150-90 の形成

これは顕微鏡で確認できないレベルのエッチングされるべき金をエッチングするためのプロ

セスである。その後、撥水性を確認出来た場合、抵抗加熱式蒸着装置でアルミニウムをデバイス層の表面に垂直蒸着した。蒸着後は SOI ウエハをアセトンに 6~8 時間程度漬けてアルミニウムのリフトオフを行う。リフトオフしたあとは表面に残っているレジストを除去するためにコンパクトエッチャで 1 [min] O₂ アッシングした。最終的に金とアルミニウムの形成が完了した SOI ウエハを Fig.3.18 に示す。この段階で金とアルミニウムにより、ショットキー接合とオーミック接合が形成されており、ショットキー障壁の高さが適切な値であることを確認するために後述の電圧電流特性の測定を行った。電流電圧特性の測定手順及び結果は 3.12 節で述べる。

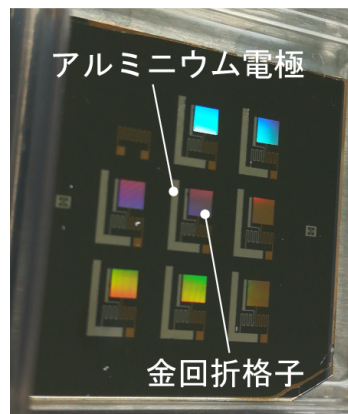


Fig.3.18: 金とアルミニウムが形成されたデバイス層表面

3.9 アルミエッチャントによるアルミニウム形成

アルミニウムを形成する別の方法として金のレジストを剥がした後、アルミニウムを蒸着した上にレジストを形成し、レジストの無い部分のアルミニウムをエッチングする方法がある。これは、リフトオフにかかる時間 (6~8 時間) を短縮することができる利点がある。本研究の分光素子を製作する製作工程にこの方法を用いてアルミニウムを形成した結果を顕微鏡で撮像したものが Fig.3.19 である。Fig.3.19 から金回折格子とパッド上にエッチングしきれていないアルミニウムが残っていることがわかる。SPR は空気中に接触している金属で反射率が変化するため、設計に沿った分光素子を製作することができない。そこでアルミエッチャントにレジストで保護されたアルミニウムの配線がすべてエッチングされるまでウエハを漬けてみたが、Fig.3.19 のアルミニウムはエッチングされなかった。この原因にはアルミニウムと金が合金になっていることや金がアルミニウムの下にあることで露光条件が変化したことが考えられる。最終的には金とアルミニウムが直接接触せず、こういった問題の発生し得ないリフトオフ法を

採用する事になった。

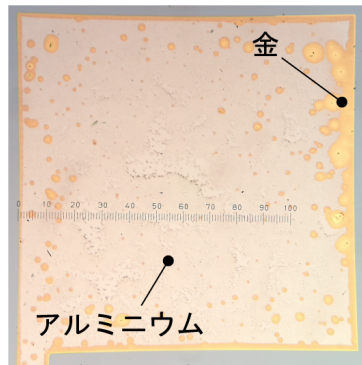


Fig.3.19: アルミニウムをそのまま金に蒸着した結果

3.10 アルミニウムのリフトオフ形成

3.9 節の結果から金の上にアルミニウムを蒸着した場合、アルミニウムをエッチングしきれない場合があることがわかった。金とアルミニウムを直接接触させないようにアルミニウムを蒸着し形成する方法としてリフトオフ法がある。本節ではこのリフトオフ法についてのプロセス条件を導出するための予備実験を行った結果について述べる。まず、リフトオフ法とはレジストを形成したウエハ上に金属を蒸着し、レジストを有機溶媒によって溶かすことでレジスト上に蒸着された金属を除去する方法である。この方法であれば金の上に接触する物質はレジストのみに限定できるため、3.9 節で問題となっていたアルミニウムがエッチングできない現象に対処できる。以下では予備実験の工程について詳細に述べる。まず、SOI ウエハを HF に 2 [min] 漬けて、表面の酸化膜を除去した。次にネガ型レジストである ZPN1150-90 の膜をウエハ上に 3.8 節と同様に形成し、光量 $19.7 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$ で 9 [s] 露光し、現像を 60 [s] 行った。現像が完了した SOI ウエハについてコンパクトエッチャで O_2 アッシングを 30 [s] 行い、BHF に 2 [min] 漬けて、撥水性を確認した。その後、アルミニウム 3 片を抵抗加熱式蒸着装置で蒸着し、蒸着したものをアセトンに 6~8 時間程度漬けた。Fig.3.21 (a) にリフトオフした結果を示す。Fig.3.21 (a) を見るとほぼ全面にアルミニウムの薄膜が残留しており、ZPN1150-90 が溶けずにアルミニウムの薄膜が残留していることがわかる。リフトオフ法ではレジストを逆テーパー形状 (Fig.3.20(b)) に形成することで、金属とレジストの間に有機溶媒が入り込む隙間を作り、レジストを溶解する。したがって、Fig.3.21 (a) の結果から金属とレジストの間の隙間が十分に形成できていないことがわかる。ZPN1150-90 の特性と Fig.3.21 (a) の結果を合わせて考えると、リフトオフ失敗の原因としては以下の要因が挙げられる。

- アルミニウム薄膜の膜厚が厚すぎて、逆テーパ形状の隙間が薄膜によって塞がれている
- アルミニウム薄膜が斜めから蒸着されることで逆テーパ形状が塞がれている
- そもそも逆テーパ形状が形成されていない

まず、アルミニウム薄膜の膜厚が厚すぎる可能性についてであるが、そもそもレジストの膜厚は 1 [μm] 以上であるのに対して、アルミニウムの薄膜はせいぜい 100~200 [nm] 程度である。このアスペクト比であればレジストの逆テーパ部が塞がれてしまう可能性は極めて低い。次に、斜めからの蒸着で逆テーパ形状が塞がれている場合であるが、その可能性も考えにくい。なぜならば、逆テーパの対面も逆テーパ形状は存在しており、片方が塞がれてしまったとしても確実にもう片方は開放されているためである。したがって、以上の考察よりレジストの形状がそもそも逆テーパに成っていない可能性が極めて高いと考えた。

逆テーパ形状が本当に形成されているのか SEM で観察した像を Fig.3.20(a) に示す。Fig.3.20(a) については、ZPN1150-90 を 9 [s]、光量 19.7 [mW/cm^2] で露光し、現像を 60 [s] 行ったものに成っている。レジストの断面図についてはダイヤモンドペンでチップを分割し、その断面を SEM で観察した。Fig.3.20(a) を見ると、たしかに逆テーパ様の形状は形成されているが、テーパ上の面の形状が歪んでいることがわかる。次に Fig.3.20(a) と同じ露光条件で現像時間を 90 [s] にしたものを Fig.3.20(b) に示す。Fig.3.20(a)(b) を比較すると、明らかに逆テーパ面の形状が異なることがわかる。この結果から現像時間は 60 [s] では現像されるべきレジストが残留してしまうことがわかった。次に露光時間を変化させて再度断面を観察した。その断面を SEM 撮像した結果を Fig.3.20(c)(d) に示す。まず、Fig.3.20(c) についてであるが明らかにテーパ形状を示しており、これではレジスト全体がアルミニウムで覆われてしまうことになる。次に Fig.3.20(d) についてであるが、逆テーパ型が形成されているとは言えない。

したがって、以上の結果から ZPN1150-90 について逆テーパ形状を形成したい場合は露光量 177 [mJ/cm^2] を照射するべきで、さらに現像時間を 90 [s] ほど取るべきであることもわかる。次に、逆テーパ構造が形成されるとわかった露光量で形成したレジストに対し実際にアルミニウムを蒸着して、リフトオフが可能なのか検証を行った。レジストを形成した後にアルミニウムを垂直蒸着し、リフトオフプロセスが成功するか検証を行った。この検証を行った結果を Fig.3.21 (b) に示す。Fig.3.21 (b) では SOI ウエハ上にアルミニウム電極が形成されておりアルミニウムの膜に関してこの条件を用いることでリフトオフできることがわかった。

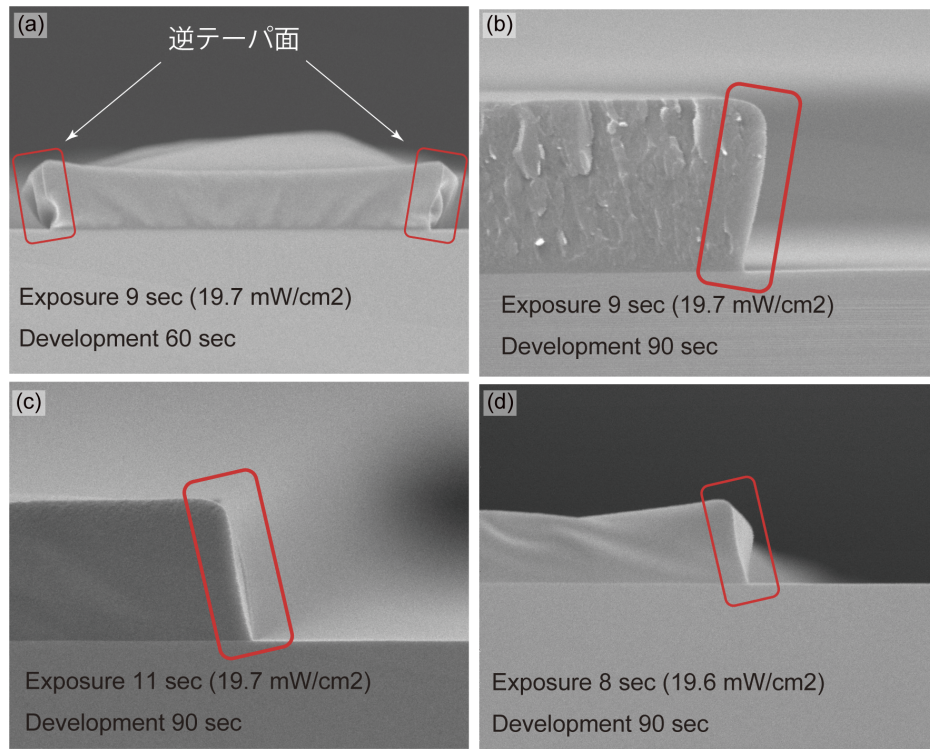
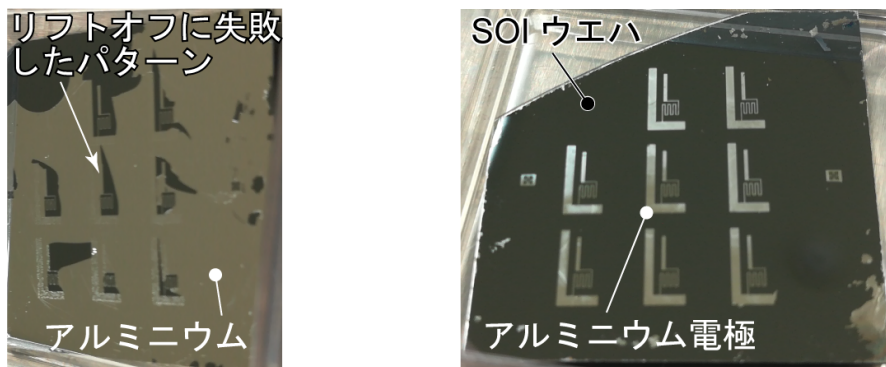


Fig.3.20: ネガ型フォトレジストの ZPN1150-90 の各露光・現像条件における逆テーパ構造の断面図 (SEM 撮像)



(a) 失敗例. ウエハの全面にアルミニウムが残留している
(b) 成功例. パターニングした部分のみにアルミニウムが残り、電極を形成している

Fig.3.21: アルミニウムのみを蒸着してリフトオフしたパターン

3.11 撥水性の有無の判断方法

Si 面が完全に露出している場合、Si は疎水性をもつため、本研究では Si 面で撥水性を持っているか否かで Si 面の露出を確認した。Si が撥水性を持っているか否かを判定する方法として本研究では以下の方法を使用した。まず 1 つ目の方法として、Si 面に水滴を垂らし、Si 表面で水滴ができるか否かで判断する方法がある。Si 表面に撥水性が無い場合、水は Si 表面全体に広がり、水滴を形成しない。Si 面が露出し撥水している例として Fig.3.22 を示す。Fig.3.22 においては、Si の表面において水滴が発生していることが確認できる。

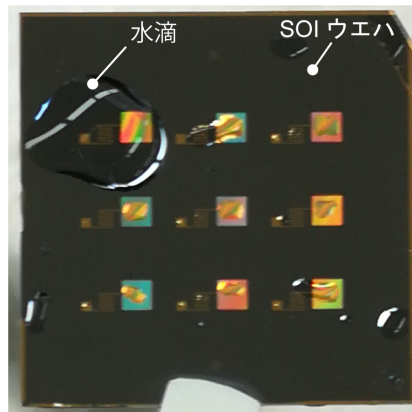


Fig.3.22: 金エッチング後に撥水性もつデバイス層表面

2 つ目の方法として、ピペットで水滴を Si 面に垂らし、エアブローで少しずつ Si 面から液滴を取り除く方法がある。この方法は Si 面が比較的小さい場合に有効であり、主にアルミニウムのリフトオフ形成のときの撥水性の確認に用いる。例として、Fig.3.23 (a) が挙げられ、撥水している状態が確認できる。Fig.3.23 (a) を見ると、Si 面とレジストの境界において水面が湾曲している様子が確認できる。この状態は Si 面の水滴がレジスト上に押し出されることによって発生している。Fig.3.23 (b) に O₂ アッシングによって酸化膜を形成した場合の例も示す。Fig.3.23 (b) を見ると水滴と空気の境界が Si 上に存在することがわかる。BHF により酸化膜を除去した場合、Si 界面は疎水性になるため、水滴が Si 上にある場合レジスト上に押し出され、Fig.3.23 (a) の状態になる。本研究では水滴がレジスト上に押し出されるこの現象を確認することで撥水性の確認を行った。なお、ここで述べた方法は簡易的なものであり、例えば Si が撥水性のある物質によって覆われていた場合はこの方法では判断できない。ただし、本研究において撥水性のある物質を Si 上にコーティングすることはないため、本節の確認方法で問題なく Si 面の露出を確認できる。

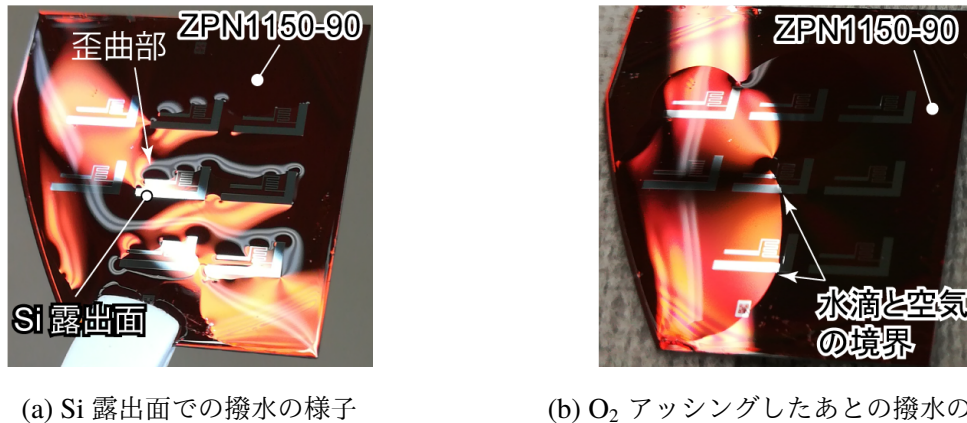


Fig.3.23: ZPN1150-90 パターニング後、ディスプレイザブルピペットで Si 面に滴下した様子

3.12 電流電圧特性の計測

本研究では金と n 型 Si との間にショットキー接合、アルミニウムと n 型 Si との間にオーミック接合が形成されているか否かを電流電圧特性 (IV 特性) を計測し、整流特性を確認することで確認した。この IV 特性は、金をアノード、アルミニウムをカソード電極として電圧 V を印加していき、流れる電流 I を計測して得た。各電極からはプローブを押しあてつけることで導通を取った。プローブは XYZ 手動ステージに取り付けられており、プローブの位置を顕微鏡で確認しながらプローブの先端を電極上に位置決めした。次に、高さ方向のステージでプローブを電極に近づけていき、プローブが電極に接触して曲がり、先端がわずかに移動した位置で停止させた。この段階で電圧を印加し、分光素子が出力する電流を計測した。この時点で電流が流れない導通していない場合、さらに高さ方向のステージ動かし、プローブを電極に押しあてつけ、再度 IV 特性の計測を行った。ショットキー障壁は一種のフォトダイオードであり、IV 特性は順方向電圧に抵抗、逆方向電圧に対しては電流を流さないといった性質をもつ。IV の計測の様子を Fig.3.24 に示す。



Fig.3.24: IV 計測の様子

3.8 節の工程を完了した分光素子について IV 特性を計測した結果を Fig.3.25 に示す。Fig.3.25 (a) を見ると前述のフォトダイオードの性質を満たしており、Fig.3.25 (b) を見ると順方向と逆方向では約 10^3 倍程度の差があることから、ショットキー接合・オーミック接合が形成されていることがわかる。

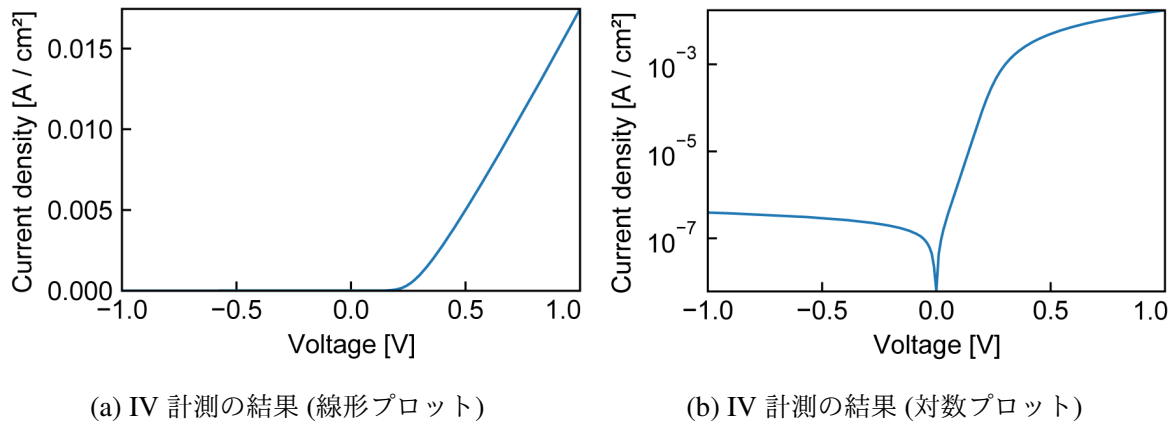


Fig.3.25: IV 計測の結果

3.13 深掘り反応性イオンエッチング (Deep Reactive Ion Etching, DRIE) によるカンチレバーの形成

この節では SOI ウエハの表面 (デバイス層) と裏面 (ハンドル層) の Si をエッチングし、設計した形状のカンチレバーを形成する段階について述べる。この段階においては 3.8 節で述べた工程を完了した SOI ウエハを用いる。SOI ウエハの上には金回折格子及びアルミニウムの電極が形成されており、このカンチレバーを形成する段階においてはこの金回折格子などの構造を保ちながら Si をエッチングする必要がある。特に金回折格子については Eq. (2.7) にも示すとおり、金表面の物質の誘電率 (主に空気) と回折格子のピッチによって SPR 発生角が決まるのであった。さらに、3.1 節の設計の項目においても金回折格子の深さによって入射角特性が大きく変化すると述べた。したがって、このカンチレバーを形成する段階においては金回折格子の構造を変化させず、さらに表面にフォトレジストなどの残留物を残さないように実行しなければならない。本節では金回折格子表面について清浄を保ったまま、カンチレバーを形成する工程について述べる。また、別の制約としてアルミニウムの電極は容易に現像液によって溶解・剥離してしまうため、裏面のフォトレジストの現像においては表面のアルミニウムの電極を保護する必要がある。本研究では裏面のフォトレジストの現像の際には表面全体をフォトレ

ジストで覆うことでアルミニウム電極を現像液から保護した。以下では、この段階の製作工程について詳細に述べる。まずネガ型レジストである ZPN1150-80 をマスク (Fig.3.10 (e)) を用いてデバイス層上に形成した。なお、露光量については逆テーパー形状を形成する必要が無いため $118 \text{ [mJ/cm}^2\text{]}$ とした。SOI ウエハのハンドル層にシリコンオイルをデバイス層全体に付着しないように薄く塗布した。このシリコンオイルは DRIE による SOI ウエハの温度上昇を軽減し、エッチングレートを安定させる働きをする。DRIE において、一般的に使用されている基板冷却用のシリコンオイルはプラズマに触れると有機溶媒で除去不可能な膜を形成するため、表面に付着しないように塗布した。アルミニウム製の 4 インチウエハ (ダミーウエハ) 上に SOI ウエハをデバイス層を上にして設置した。このときシリコンオイルが漏れ出さないようにウエハの四辺をカプトンテープで封止した (Fig.3.26)。

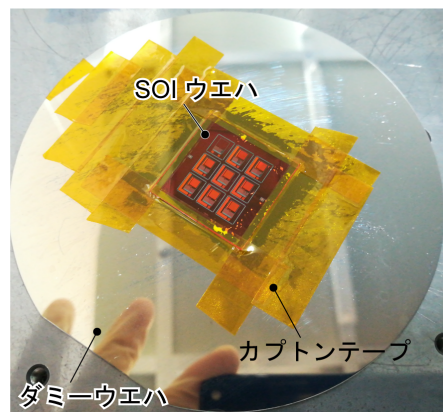


Fig.3.26: 表掘りのときの様子

次に SOI ウエハのデバイス層に対して DRIE を実行した。DRIE は RIE と同様にイオン化したガスを Si と反応させることで Si を異方エッチングする方法で、側壁を C_4F_8 で保護しながらエッチングを行うため、 μm オーダーの垂直穴を形成できる。DRIE は日によってエッチングレートが変化するため、前回得られていたエッチングレートで最終的にエッチングしたい深さの半分程度まで DRIE を行い、現状のエッチングレートを計算する。次に段差計を用いて掘った深さを確認し、エッチングレートを計算し、新しく得られたレートで半分程度 DRIE を行う。最終的にボックス層が完全に露出するまでこの工程を繰り返す。ダミーウエハから SOI ウエハを取り外し、ハンドル層表面に残ったシリコンオイルをエタノールに浸したベンコットで除去した。この時、シリコンオイルがデバイス層に付着しないようにした。次にレジストを除去するためにアセトンに SOI ウエハを 5 [min] に浸す。アセトンから SOI ウエハを取り出した後、エタノールでリンスし、30 [s] 程度流水洗浄した。この時に得られるデバイス層表面の様子が、Fig.3.27 である。Fig.3.27 からアセトンでも DRIE の影響で固化した

3.13 深掘り反応性イオンエッチング (Deep Reactive Ion Etching, DRIE) によるカンチレバーの形成 45

ZPN1150-80 を取りきれないことがわかる。さらに、これを表面の金やアルミニウムのパターンを保護する目的でそのまま放置し、プロセスを続行した結果が Fig.3.28 である。この状態になってしまうと、アセトンやピラニア溶液でも取り除くことが出来ない膜が形成されてしまう。この除去不可能な膜により金回折格子表面の誘電率や形状が変化し、正常な測定を行うことが不可能になる。そこで、アセトンで取りきれなかった ZPN1150-80 についてはコンパクトエッチャによる O_2 アッシングで除去した。最終的に 6 [min] O_2 アッシングを行うことで Fig.3.29 のようなデバイス層表面を得た。

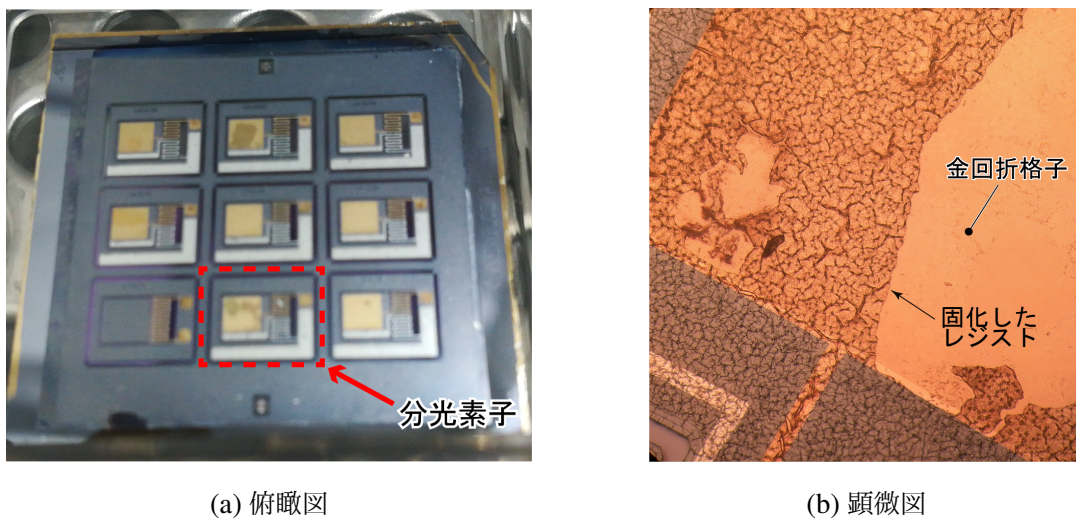


Fig.3.27: 表掘り後にアセトンから引き上げたときのデバイス層表面

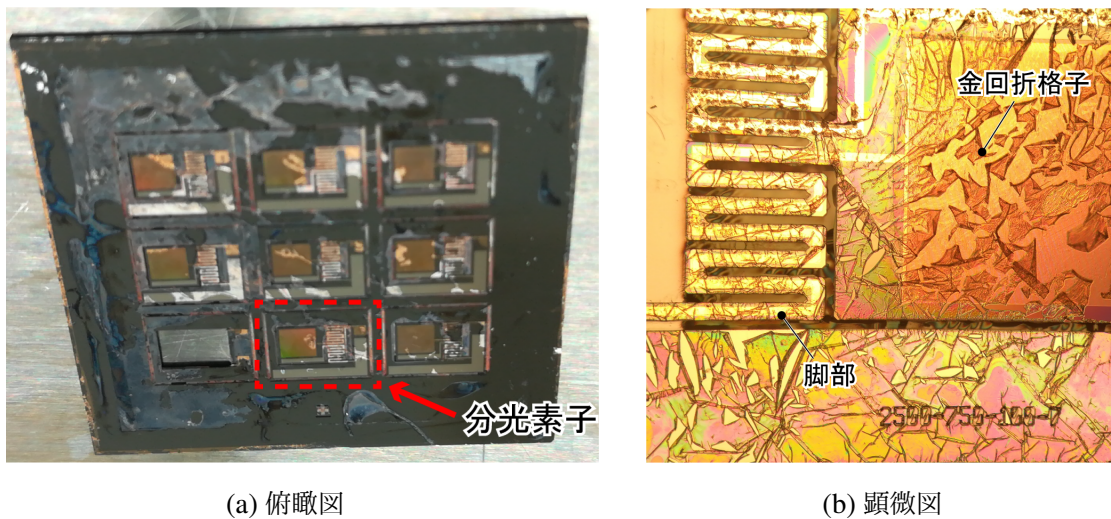


Fig.3.28: 除去不可能な膜が形成されている様子

次にウエハ両面を約 30 [s] 流水洗浄した。流水洗浄した SOI ウエハのデバイス層を上にし

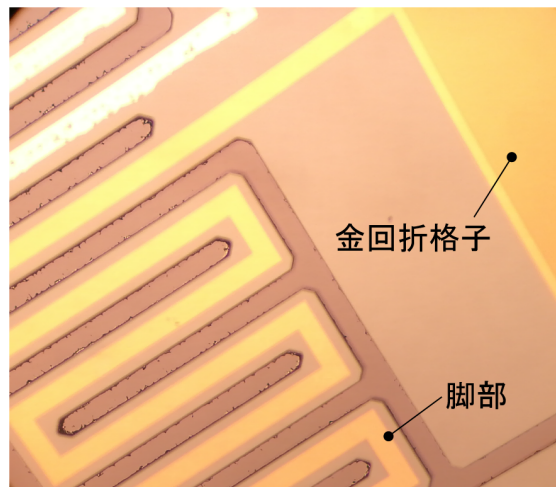


Fig.3.29: 表掘り後 O₂ アッシングしたデバイス層表面 (顕微鏡)

て、110 [°C] のホットプレートで 3 [min] 程度熱した。オープンから SOI ウエハを取り出した後、数 [s] エアブローし、デバイス層を上にしてスピンのコーターに設置した。ポジ型フォトリソレジストである JSR7790G を SOI ウエハのデバイス層表面に万遍なく滴下し、30 [s] の間、回転数 3000 [rpm] で回転させた。これは、次の段階で行う ZPN1150-80 の現像の時、デバイス層表面の金とアルミニウムのパターンが現像液によって剥離する (Fig.3.30) ため、それを防ぐ狙いがある。スピンのコートが完了したら、110 [°C] のオープンで 2 [min] 熱した。

次に、裏掘りのレジスト形成を行った。3.7 節と同様の方法でマスク・SOI ウエハを洗浄した。ZPN1150-90 を SOI ウエハのハンドル層表面に万遍なく滴下し、30 [s], 3000 [rpm] で回転させた。スピンのコートが完了したら、90 [°C] のオープンで 90 [s] 熱した。次に、マスクアライナで熱した SOI ウエハのハンドル層にパターン (Fig.3.10 (f)) を 6 [s] 露光した。露光が完了したら、110 [°C] のオープンで 60 [s] 熱した。その後 SOI ウエハを NMD-3 によって現像した。現像は約 1 [min] で完了し、レジストが正常に形成されていることを顕微鏡で確認した。次に表掘りの時と同様の方法で DRIE をハンドル層に対して行う。裏掘りについては表掘りのときとは異なり、エッチングする深さが大きく異なるため (表: 25 [μm]、裏: 500~625 [μm]) 各素子ごとにエッチングレートの差が顕著になる。これによって、エッチングが完了し、ガラス面が露出した素子とそうでない素子が混在することになる。実際にエッチングレートの偏りによって中心部の素子についてエッチングしきれなかった例について Fig.3.32(a) に示す。Fig.3.32(a) を見ると四隅の素子についてはエッチングが完了しており、中心及び四辺の素子についてはエッチングが完了していないことがわかる。この現象の問題点は中心の素子をエッチングする際に四隅の素子のガラス層が DRIE によって破壊される可能性があるという点である。ガラス層が破壊されることで構造の欠損やプラズマの素子表面への侵入が想定される。し

たがって、本研究では Fig.3.32(c)(d) に示すように四隅の素子の裏掘りのレートが早ければ四隅を、四辺のレートが高ければ四辺をアルミニウム箔で塞ぐことでこの問題を解決した。実際に、この方法によってガラス層が破壊される可能性を排除しつつ Fig.3.32(b) に示すように基板上のすべての素子について裏掘り工程を完了した。ボックス層は可視光を通すのでハンドル層側からデバイス層を顕微鏡を通して観察する (Fig.3.31) ことができ、デバイス層がすべてハンドル層側から確認出来た段階で裏掘り工程は完了である。裏掘り工程が完了した SOI ウエハを Fig.3.33 に示す。

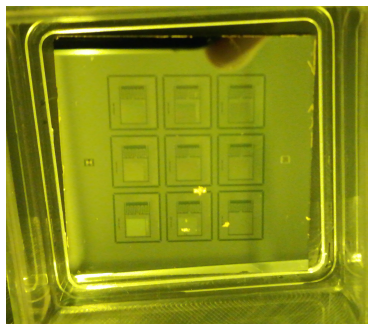


Fig.3.30: 現像液により金・アルミニウムともに剥離した様子

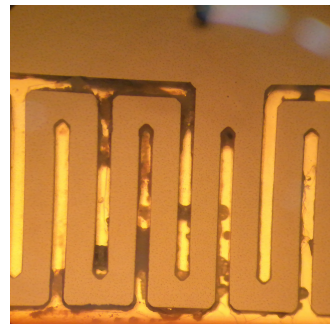


Fig.3.31: 裏掘り時、ハンドル層側から観察できるデバイス層

裏掘り工程が完了した SOI ウエハはダミーウエハとともにイソプロピルアルコール (IPA) に漬ける。IPA 内でデバイス層を破壊しないようにカプトンテープを少しずつ取り外し、ダミーウエハから取り外す。IPA 内から引き上げ、アセトンに 6~8 時間程度漬けてデバイス層に付着したレジストとシリコンオイルを除去した。アセトンから取り出し、ヘキサンに 1 [min] 漬け、IPA に 1 [min] 漬けた後に取り出し、自然乾燥させる。自然乾燥させた SOI ウエハのデバイス層を Fig.3.34 (a) に示す。前述のように有機溶媒で洗浄したとしても表面にレジストが残ってしまう。コンパクトエッチャによって 2 [min] O₂ アッシングした分光素子表面が Fig.3.34 (b) である。Fig.3.34 (a) で残留していたレジストがすべて除去されていることがわかる。

3.14 フッ酸蒸気エッチング

この節ではカンチレバーを固定する層であるボックス層を除去するフッ酸蒸気エッチングについて述べる。本研究のカンチレバー構造の厚さは 25 [μm] と非常に薄く、破壊されやすい。ボックス層はこのカンチレバー構造を有機溶媒などからかかる面圧や表面張力から保護する役

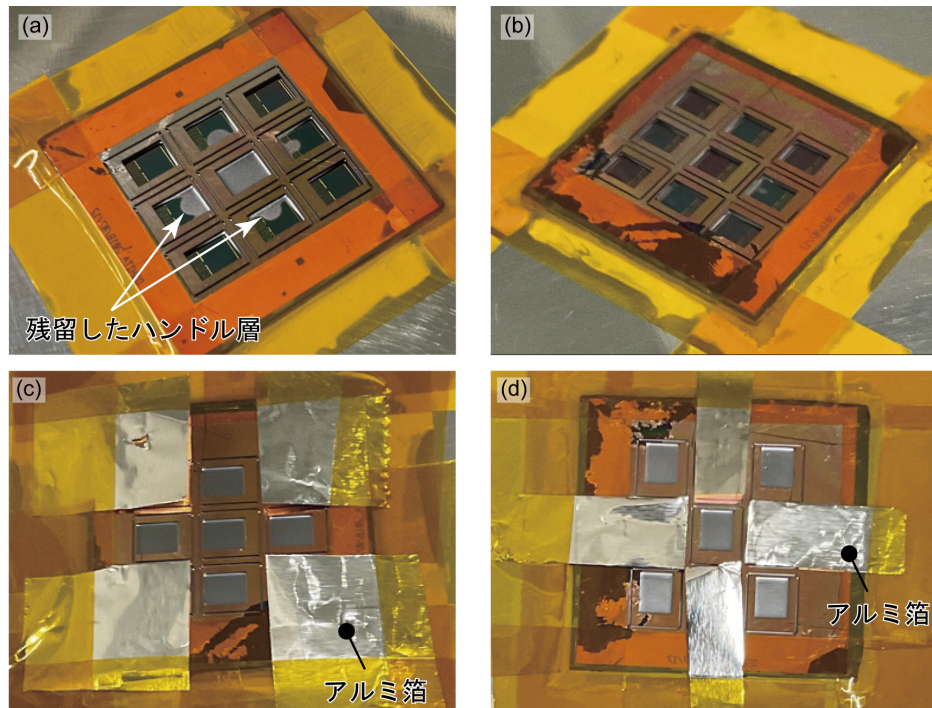


Fig.3.32: (a) 裏掘り時に場所によってエッチングレートが変化している例 (b) ハンドル層をすべて掘りきった例 (c) 中心部が四隅と比較してエッチングレートが低い場合の対処 (d) 四隅が四辺と比較してエッチングレートが低い場合の対処

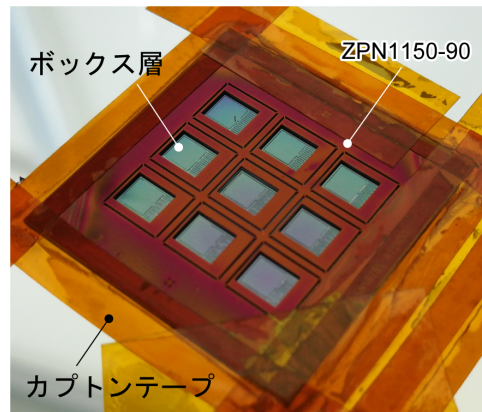


Fig.3.33: 裏掘り直後の SOI ウエハ

割がある。この工程ではフッ酸 (HF) の蒸気によりこのボックス層を除去し、カンチレバーを駆動できるようにする。通常、HF エッチングは液中で行うが、その場合、前述の通りカンチレバー構造に力がかかってしまう。HF の蒸気をボックス層に当てることによって力を加えずにカンチレバーを開放できる。HF の蒸気とボックス層を構成するガラス (SiO_2) の化学反応式を Eq. (3.1) に示す。

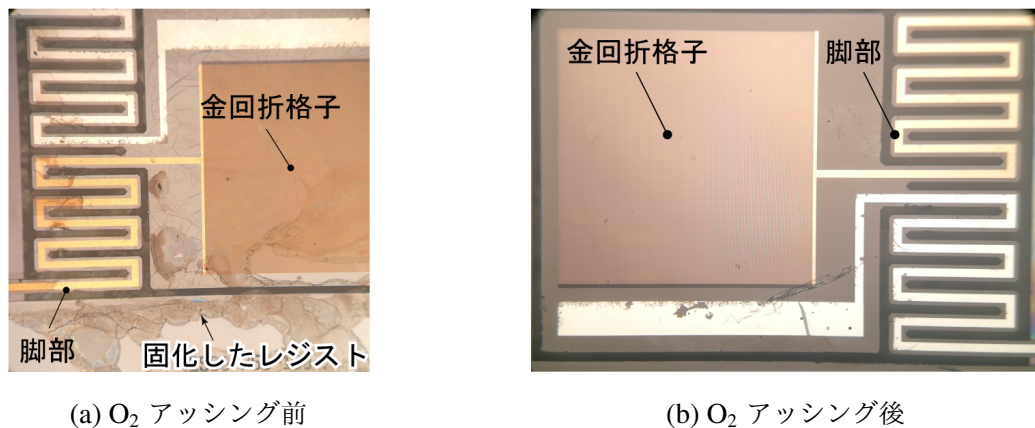
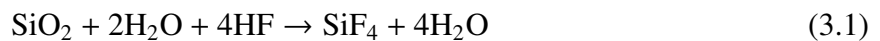


Fig.3.34: ダミーウエハから取り外し表面を有機溶媒で洗浄したデバイス層表面



Eq. (3.1) によると HF とガラスが反応することによってカンチレバー表面に水が発生することがわかる。この水はカンチレバー表面に残留し、HF の蒸気が水に溶ける二次反応により分光素子表面のアルミニウム電極を破壊する。さらに、水は表面張力によって微細構造を破壊する。したがって、本研究ではこの水の液化を防ぐためにカンチレバー表面を約 40 [°C] に加熱し、発生した水を蒸発させた。以下では、この段階の製作工程について詳細に述べる。3.13 節で述べた製作工程を完了した SOI ウエハを使用した。SOI ウエハを固定するためのテフロンシートをホットプレートに貼り付けて、テフロンシート上に SOI ウエハをカプトンテープで貼り付けた (Fig.3.35(a))。この時、SOI ウエハのデバイス層がテフロンシートに接触しないようにテフロンシートにくぼみを作った。HF をテフロン加工されたシャーレに浸し、ホットプレートを 40 [°C] に設定した。ホットプレートの表面温度が 40 [°C] に達したことを確認し、ホットプレートを裏返し SOI ウエハのハンドル層が HF の直上に来るようにホットプレートをシャーレ上に設置した (Fig.3.35(b))。この時、HF はホットプレートの熱によって気化され、SOI ウエハのボックス層をエッチングした。この工程を 1 [min] ごとに SOI ウエハを取り外して、デバイス層の様子を顕微鏡で確認しながら、ボックス層が完全に除去されるまで繰り返した。Fig.3.35(c) にカンチレバー脚部においてボックス層が除去される前の画像を示し、Fig.3.35(d) にボックス層が除去された後の画像を示す。フッ酸蒸気はボックス層をエッチングするとともにデバイス層のアルミニウムも低レートではあるがエッチングするためアルミニウムがエッチングされていないか取り外すたびに確認した。Fig.3.36 にアルミニウムの配線がエッチングされている様子を示す。ボックス層のエッチングが完了したら、SOI ウエハから分光素子をピンセットで分割した。Fig.3.10 のマスクパターンであれば、9 個の素子に分割で

きる。

(a)



ホットプレート

(b)

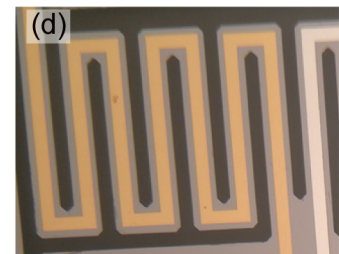
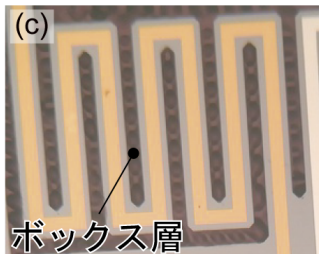
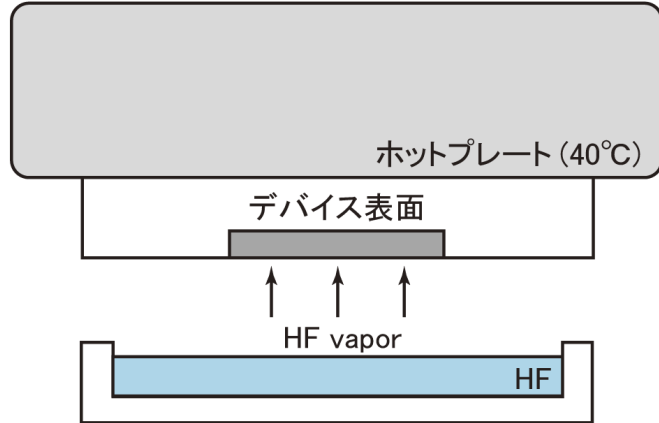


Fig.3.35: (a) フッ酸蒸気エッチング時のセットアップ (b) 概念図 (c) エッチング前 (d) エッチング後

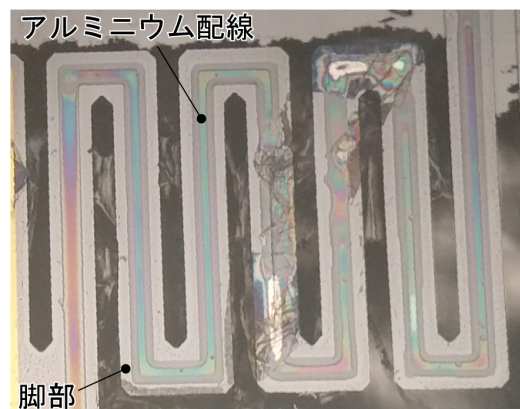


Fig.3.36: フッ酸蒸気によってエッチングされたアルミニウムの配線

3.15 基板への実装

この節では 3.14 節で分割した分光素子を基板に実装し、電極を取る段階について述べる。まず、クイックポジ感光基板 (サンハヤト、NZ-P12K) を用いてボンディングを行う銅の電極

を形成した。分光素子は裏側から音圧を加える必要があるため基板には分光素子の裏掘りの穴と同様の大きさの穴を開けた。分光素子を基板に瞬間接着剤 (アラルダイト) で固定した。この時基板の裏側からカンチレバーが確認できるように分光素子の位置を調整した。ボンディングに使用したワイヤボンダ (ハイソル社製, 卓上型マニュアル ウエッジワイヤーボンダー MODEL-7476D) は超音波によってアルミニウムを圧着する方式であり、薄膜にボンディングする場合、薄膜を破壊してしまったり、貫通して n 型 Si とコンタクトを取る場合がある。本研究における分光素子は 3.1 節にある通り、金膜は厚さが 100 [nm] となっており超音波ボンディングをする場合、ボンディングする箇所を保護しなければならない。本研究では銀ペースト (ドータイト) を用いて金膜を保護した*6。銀ペーストはプローバーを用いて金のパッド上に塗布した。具体的には顕微鏡下で銀ペーストのダマをプローブの先端に乗せるように分光素子上の金のパッドに付着させて塗布した。この時、銀ペーストは金の面とのみ接合するようしなければならない。銀ペーストを分光素子上の金のパッドに塗布した様子を Fig.3.37 に示す。次にボンディングを行う銅の電極にディスポーザブルピペットで酢酸を塗布し、ベンコットを巻き付けた竹串で酢酸を拭き取ることで銅の電極の表面の酸化膜を除去し、ボンディングに適したものにした。最終的に基板の銅電極と金とアルミニウムのパッドをボンディングにより接続した。ボンディングワイヤにはアルミニウムを用いた。分光素子がボンディングされた様子を Fig.3.38 に示す。

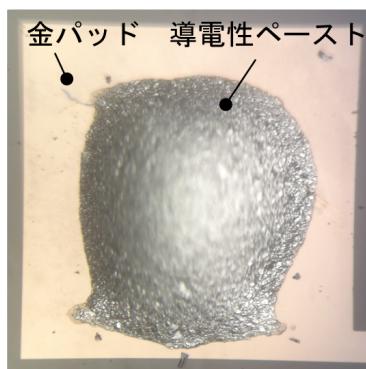


Fig.3.37: 金のパッドに銀ペーストを塗布した様子

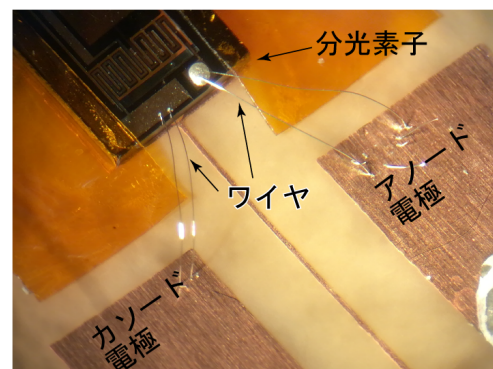
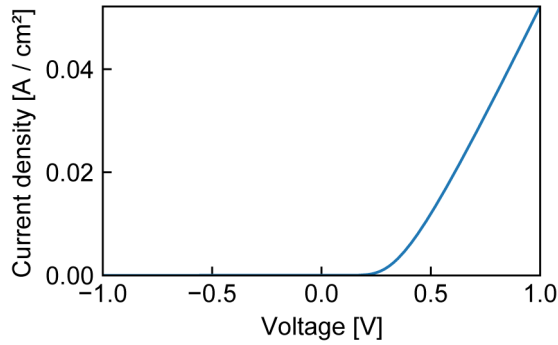


Fig.3.38: ワイヤボンディングした分光素子

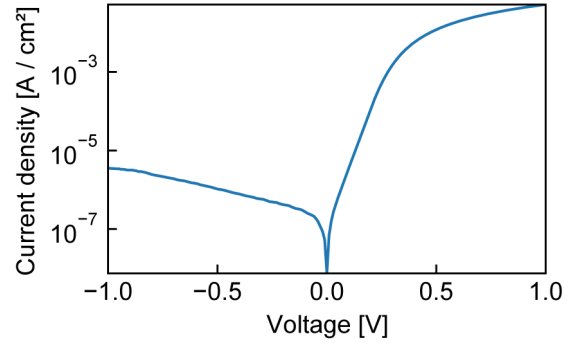
次に、正常にボンディング出来ており、分光素子にショットキー接合とオーミック接合が形成されているか確かめるために IV 計測を行った。測定結果を Fig.3.39 に示す。Fig.3.39 (a) はフォトダイオードの特徴である整流特性を示しており、Fig.3.25 (b) を見ると順方向と逆方向

*6 https://www.researchgate.net/post/How_can_I_connect_metal_wire_with_thin_metal_film_deposited_on_a_glass_substrate

では 10^3 倍程度の差があることから、金側でショットキー接合・アルミニウム側でオーミック接合が形成されていることがわかる。したがって、本章で述べたボンディング方法で正常に電極を取り出せることがわかる。



(a) IV 計測の結果 (線形プロット)



(b) IV 計測の結果 (対数プロット)

Fig.3.39: ワイヤボンディングした分光素子の IV の計測結果

3.16 ショットキー障壁高さの計算

3.15 節で計測した IV 特性を利用することでショットキー障壁の高さ Φ_B [eV] を計算することができる。このショットキー障壁が高いほど障壁を乗り越えるのに必要なエネルギーも高くなる。具体的にはカットオフ波長 λ_{cutoff} (Eq. (3.2)) がこのショットキー障壁高さで決定され、カットオフ波長よりエネルギーの低い波長の光は検出できない。

$$\lambda_{\text{cutoff}} = \frac{hc}{\Phi_B} \quad (3.2)$$

なお、 c は光速、 h はプランク定数 ($6.626070040 \times 10^{-34}$ Js) である。具体的なショットキー障壁の計算方法は IV 特性を Eq. (3.3) 及び Eq. (3.4) でフィッティングすることで求められる [63]。

$$\frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln(I))} = \frac{qR}{kT} I + n \quad (3.3)$$

$$H(J) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{J}{A^* T^2} \right] = S J R + n \Phi_B \quad (3.4)$$

Eq. (3.3) 及び Eq. (3.4) における各変数については以下のように定義した。

I ダイオードに流れる電流 [A]

V 計測器まで含めた全体での電圧降下 [V]

q 電気素量 [C]: $1.60217662 \times 10^{-19}$

k ボルツマン定数 [JK⁻¹]: $1.38064852 \times 10^{-23}$

n ideality factor(無次元量)

T 温度 [K]

I_s 比例定数

R ダイオード以外の部分での抵抗値 [Ω]。等価回路では内部直列抵抗となる。

V_D ダイオードの両端での電圧降下 [V]: $V_D = V - IR$

A^* 有効リチャードソン定数 (無次元量): 110

Φ_B ショットキーバリアの高さ [eV]

S ダイオードの有効領域 [cm^2]

Fig.3.25 (c) の IV 特性を利用してショットキー障壁を計算した結果、ショットキー障壁の高さは $\Phi_B = 0.77$ [eV] となり、カットオフ波長 λ_{cutoff} はおよそ 1600 [nm] と計算できる。この結果から分光素子は近赤外領域の約半分の領域をカバーできることがわかった。この計算の前提として基板の温度を 293 [K]、ダイオードの有効面積を 0.0675 [cm^2] として計算を行った。また、フィッティングには電圧が 0~1 [V] の範囲のデータを用いた。

ここでそれぞれ異なる工程によって製作した分光素子の IV 特性 (対数表示) について Fig.3.40 に示す。

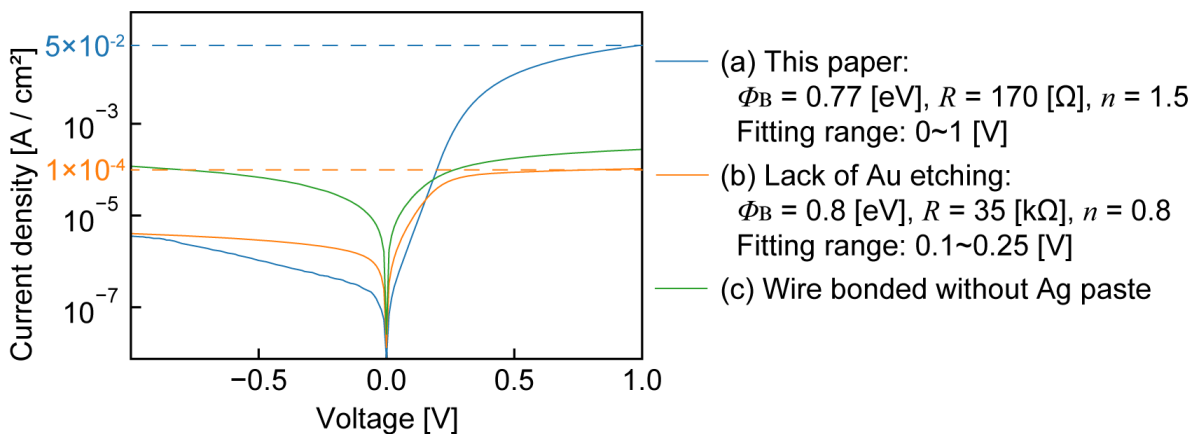


Fig.3.40: 製作工程の差異による IV 特性 (対数表示) の違い

まず、Fig.3.40(a) のグラフは本章で述べた工程で製作した分光素子から得られたもので、Fig.3.40(b) のグラフは Fig.3.8 の工程のネガ型レジストを形成した後に金エッチャントにウエハを浸ける工程を省いたものである。また、Fig.3.40(c) については Fig.3.40(b) の分光素子について 3.15 節 の工程において銀ペーストで金膜を保護しなかった場合の特性グラフである。また、Fig.3.40(a) と (b) については本節のフィッティングで得られたパラメータを併記する。それぞれのフィッティングについては Fig.3.40(a) は $0 \sim 1$ [V] を Fig.3.40(b) は $0.1 \sim 0.25$ [V] を用いた。この範囲はフィッティングが満たすべき条件 ($V_d > 3kT/q$, [63] を参照) が満たされるように選択した。Fig.3.40(c) のフィッティングについては、フィッティングが満たすべき条件 ($V_d > 3kT/q$) を満たす電圧の範囲が見つからなかったため、パラメータを併記していない。まず、Fig.3.40(a)(b) では双方とも整流特性が確認でき、ショットキー接合及びオーミック接合が形成されていることが確認できる。しかし、Fig.3.40(c) では整流特性が確認できない。また、Fig.3.40(c) の線形表示を Fig.3.41 に示す。

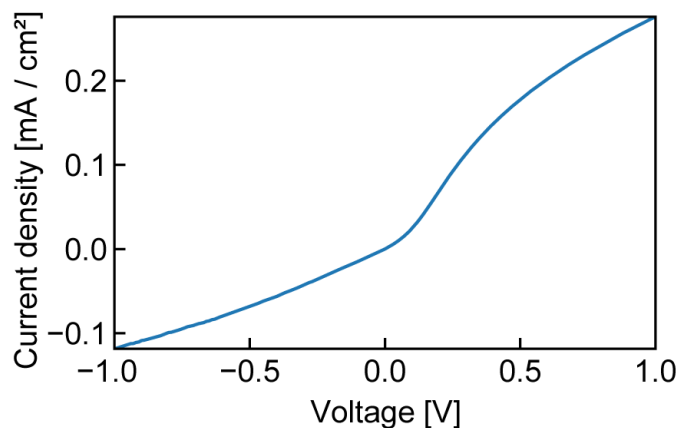


Fig.3.41: 銀ペーストによる保護なしでアルミニウムワイヤによるボンディングを行った後に計測した IV 特性 (線形表示)

この現象は 3.15 節でも述べたようにワイヤボンディングによって金膜が破壊され、アルミニウムワイヤとウエハが導通して発生すると考えられる。アルミニウムワイヤとウエハが導通することで、ショットキー障壁を経由せずに逆方向電流が流れることが主な原因である。したがって、ボンディングの際には 3.15 節で提案したとおりに金のパッド部分を銀ペーストで保護する必要があると結論付けられる。次に Fig.3.40(a)(b) で比較すると、Fig.3.40(b) の方が直列抵抗値 R について 10^2 倍大きいことがわかる。この現象はアルミニウム電極とウエハの間に金が残留することで発生しており、残留した金がアルミニウム電極側にもショットキー障壁を形成することで発生する。金側における順方向電流はアルミニウム側での逆方向電流に相当するため、順方向にも大きな抵抗値が生じると考えられる。また、正方向に 1 [V] 印加した

ときに流れる電流密度も Fig.3.40(b)の方が 10^{-2} 程度小さいことがわかる。分光素子の出力を計測する機器には計測可能な下限値が存在するため、この電流密度では素子の出力を計測できない場合がある。実際に Fig.3.40(b)の分光素子に 1200~1500 [nm]の光を照射したところ現状の計測系では応答が見られなかった。したがって、本研究では Fig.3.40(a)の特性を示した分光素子のように Fig.3.8の工程においてネガ型レジストを形成した後に金エッチャントにウエハを浸ける工程を設けた。

第 4 章

分光素子の基礎特性

この章では試作した素子が分光器として機能するために必要な基礎特性を示すか検証した結果について述べる。分光素子が持つべき基礎的な特性の一つとして SPR による波長選択的な光検出が挙げられる。そこで、4.1 節では、カンチレバー上に形成された金回折格子において SPR が発生し、その SPR を光電流として検出できるか検証した結果について述べる。また、3.1 節の仕様よりオンチップ上での角度走査が ± 2 [deg] の範囲で実行可能かという点も検証すべきである。したがって、4.2 節では分光素子のカンチレバーの共振点や角度振幅などの機械的特性について述べる。最後の条件として上記 2 つの特性を同時に実現できるという点が挙げられる。そこで 4.3 節では、音圧によってカンチレバーを共振させることで、入射角を走査し光応答特性を得る方法について述べる。

4.1 金回折格子型プラズモニック光検出器の入射角特性

試作した素子の金回折格子において SPR を発生させ、それを電流検出できるか検証を行った。第 2 章でも述べたとおりに、SPR は Eq. (2.7) で示す入射角において発生し、その角度で光検出器の出力はピークを示すのであった。そこで本実験ではそのピークを計測するために入射角ごとに光検出器が出力する光電流を記録する実験系 (Fig.4.1(a)) を構築した。なお、この節ではプラズモニック光検出器の特性を MEMS 角度走査機構と分離して調査するために入射角走査を外力ではなく自動回転ステージで行った。まず、構築した実験系の概要を述べる。分光素子は自動回転ステージ上に金回折格子の溝が回転軸と平行になるように設置した。波長可変光源から金回折格子表面に単色光を偏光子 (PBSW-10-10/20, Sigma Koki, Japan) によって、TM 偏光に変換し、入力した。この状態で回転ステージが駆動することで金回折格子

への入射角が走査され、入射角ごとの光電流信号を得ることができる。単色光は可視光から近赤外光を出力する SC(supercontinuum) 光源 (SC450-27, FIANIUM, U.K., Fig.4.3 (a)) から出力された白色光を Acousto-Optic Tunable Filter(AOTF) (Crystal Technology, Inc., AODS 20200-8, Fig.4.3 (b)) と呼ばれる外部信号により透過波長を操作可能なフィルタを介して生成した。この SC 光源から波長可変な単色光を出力する系のブロック図を Fig.4.4 に示す。AOTF が透過する波長は RF ドライバ (Fig.4.3 (c)) から AOTF に入力される高周波信号の周波数によって決定される。出力したい波長 λ_o から高周波信号の周波数 f_o を計算するフィッティング関数は Eq. (4.1) で表現できる。また、SC 光源は 450 [nm]~2400 [nm] までの帯域の波長を出力しており、この波長域において単色光を出力できる。

$$f_o = -1.832 \times 10^{-8} \lambda_o^3 + 9.973 \times 10^{-5} \lambda_o^2 - 2.003 \times (0.1) \lambda_o + 1.735 \times 100 \quad (4.1)$$

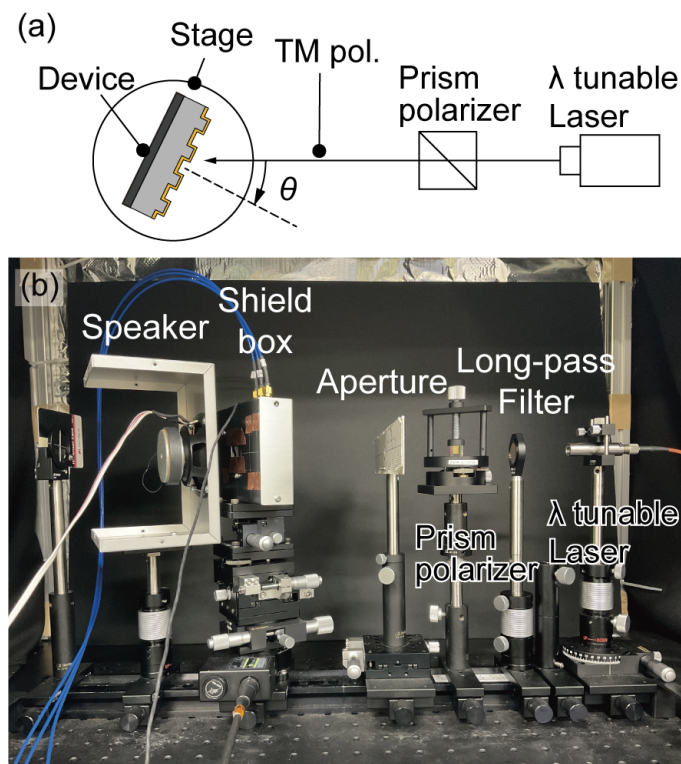


Fig.4.1: 回転ステージにより入射角を走査しながら光電流計測する実験系の (a) 概要図及び (b) 写真.

AOTF でフィルタした光の中には可視領域の迷光が含まれている場合があるため、AOTF でフィルタした光はロングパスフィルタ (FEL1000, Thorlabs, U.S.A.) を通し、可視光領域の迷光を除外した (Fig.4.1(b)). 偏光子によって TE 偏光成分を除外したあとに、アパーチャ (直径 2 mm) でスポット径を狭めた。アパーチャを通過した単色光はシールドボックス内に設置さ

れている分光素子の金回折格子表面へと入射した。アパーチャから分光素子までの距離は 123 [mm] であった。分光素子及びその信号を増幅する電流電圧変換アンプは周囲の電磁ノイズの影響を受けないようにシールドボックス内に設置した。また、シールドボックスの前面には、入射角 $-30 \sim 30$ [deg] の光が入力できるように穴を開けた。分光素子からの光電流信号 I_{in} は Fig.4.2 の回路図で示される電流電圧変換アンプにより電圧信号 V_{out} へと変換した。ただし、フィードバック抵抗 R_f は 10 [M Ω]、位相補償用容量 C_f は 3.7 [pF] と成っており、出力電圧は $V_{out} = -R_f I_{in}$ で計算できる値となる。

分光素子の金回折格子表面に単色光を照射しながら、分光素子が出力する光電流信号を電流電圧変換アンプで電圧に変換し、ソースメータ (ADCMT, 6242, Japan, Fig.4.3 (d)) で計測した。自動回転ステージによって入射角を -20 [deg] から 20 [deg] まで 0.2 [deg] ずつ走査しながら、分光素子が出力する信号を記録した。出力した単色光の光強度はパワーメータ (S122C, Thorlabs, U.S.A.) で事後に計測した。なおこの測定においてはスピーカはシールドボックスの回転と干渉するため取り除いた (Fig.4.1(b))。

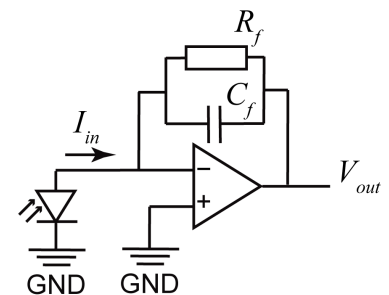


Fig.4.2: 使用した電流電圧変換アンプの回路図



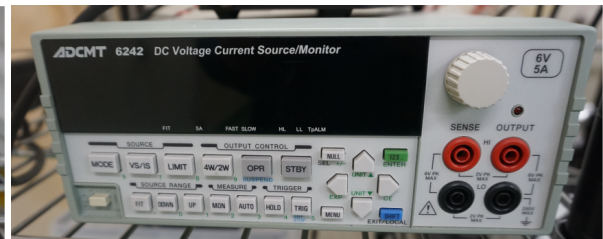
(a) SC 光源 (FIANIUM, SC450-2)



(b) AOTF (FIANIUM, NIR2)



(c) RF ドライバ



(d) ソースメータ (ADCMT, 6242)

Fig.4.3: 実験に使用した装置

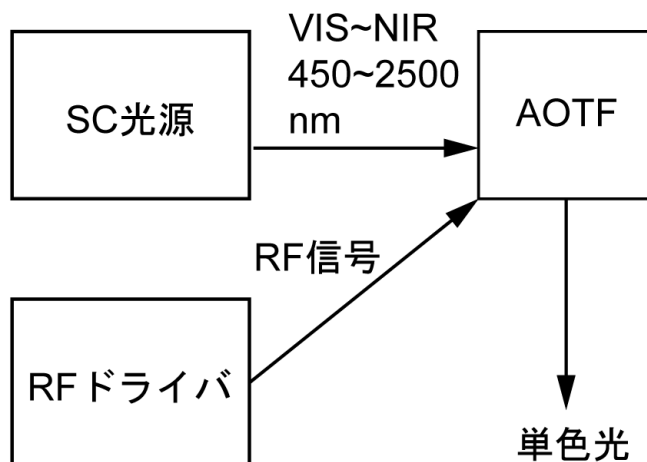


Fig.4.4: SC 光源から波長可変な単色光を出力する光学系

分光素子の各入射角における光応答性 (分光素子の出力電流 [A] をパワーメータで計測した入射光強度 [W] で割った値) を Fig.4.5 に示す。図中の各ピークの起因となった SPR の回折次数 m も同図に示した。Fig.4.5 を見ると、入射波長ごとに異なる入射角でピークが発生していることがわかる。また、これらのピークの入射角度は、波長の変化に伴って系統的に変化していることがわかる。さらに、計測した光電流信号のピークと SPR 発生の理論値をプロットした図が Fig.4.6 である。SPR 発生の理論値は Eq. (2.7) を用いて計算した。Fig.4.6 にはピークに対応する回折次数 m も示している。理論値は Eq. (2.7) から計算した。ただし、金の誘電率に関しては第 2 章に示した方法で求めた。Fig.4.6 の実測値と理論値は最大で 3 [deg] の誤差があるが、理論値の直線の傾きと実測値がシフトする方向が明確に整合していることから、このピークは SPR に起因するものであるとわかる。したがって、試作した分光素子は、金回折格子上で入射光によって SPR を発生させ、それを電流検出できると結論づけられる。

4.2 カンチレバーの機械的特性

分光素子のカンチレバーを音圧によって共振させることで 4.1 節の実験と同じ入射角走査範囲 (-20 [deg] から 20 [deg]) が得られるか検証を行った。これにより、音圧による角度走査で得られた信号と回転ステージによる角度走査で得られた信号を比較できる。まず、音圧による測定では広範囲に周波数をスイープして角度振幅を計測できないためカンチレバーの共振周波数をレーザドップラー振動計 (MLD-221D, Neoarc Corp., Japan) で測定した。これによりカンチレバーのおおよその共振周波数を求められる。分光素子の実装された PCB 基板はピエゾアクチュエータ (Tokin Corporation, AE1414D16, Japan) に取り付けられ、面外方向の外部振動

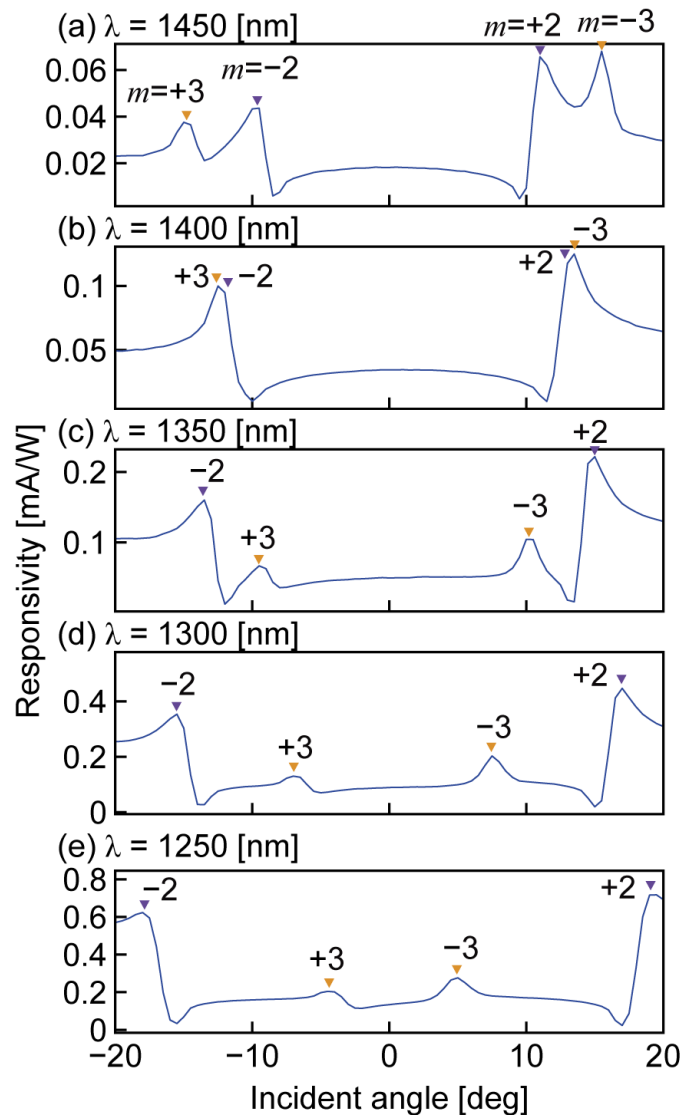


Fig.4.5: (a)~(e) 波長 $\lambda = 1450, 1400, 1350, 1300, 1250$ nm を入力したときの入射角特性

が加えられるようにした (Fig.4.7(a)). カンチレバーの先端にレーザドップラー振動計からのレーザースポットを当てながら、20~2000 [Hz] の強制振動を piezoelectric アクチュエータから与えた。カンチレバー周辺の剛体基板に対する振幅のゲインプロット (Fig.4.7(a)) を求めたところ、一次共振は 395 [Hz] に現れた。これは 3.1 節の有限要素計算の結果 (391 [Hz]) と整合的である。この結果は確かに 4 [Hz] の誤差が見られるが、レーザドップラーによる計測はあくまで共振点のおおよその位置を求めるための実験であり、目的は達成できたと言える。音圧で計測する際にはこの共振周波数周辺で角度振幅が最大になる周波数を探索する。

次に分光素子に近赤外光を入力可能な実験系 (Fig.4.1(b)) におけるカンチレバーの角度振幅の計測について述べる。前述のドップラー計測で、想定される共振周波数は、SPR 素子などを

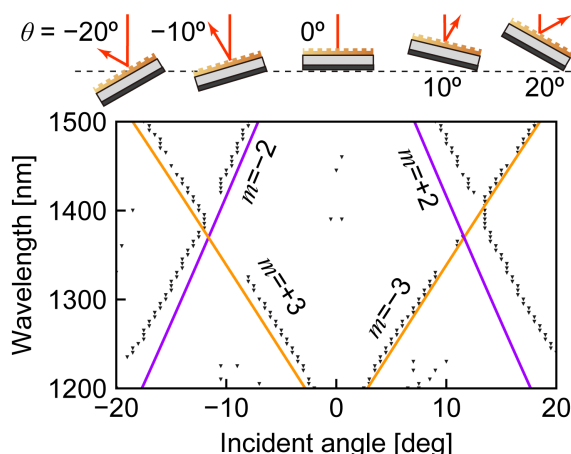


Fig.4.6: 計測した光電流信号のピークと SPR 発生角の理論値の比較

組み込んでも達成できていたため、ここでは具体的な角度振幅が前述の想定範囲を達成できているかを判別する。この計測においては回転ステージによる入射角特性を計測した系と同じ光学系 (Fig.4.1(b)) を用いた。Fig.4.1(b) におけるアパーチャは Fig.4.7(b) の分光素子前面に設置されたスクリーンと同一である。スクリーンに開けられた穴から分光素子の金回折格子に可視光レーザーを照射した。可視光は波長可変光源への指示値を可視光の波長 ($\lambda = 600$ [nm]) に対応したものにすることで出力した。金回折格子表面で回折した光はスクリーン上にいくつかのスポットを形成する。今回は 0 次回折光 (=反射光) のスポットを利用してカンチレバーの角度振幅を求める。Fig.4.7(b) の系においてカンチレバーの角度振幅を求めるのに必要な情報は以下の 2 つである。

1. 分光素子とスクリーンとの距離 L_1
2. スクリーンに映し出された 0 次回折光が描画する像の長さ L

分光素子とスクリーンとの距離 L_1 については各要素を固定している光学系のベンチキャリアの間の距離と各光学部品の寸法から計算できる。特に分光素子のベンチキャリア上での相対位置は光軸とのアライメントによって自動回転ステージの回転軸上に決定されている。したがって、今回の実験においてはベンチキャリア間の距離と各光学部品の寸法から $L_1 = 127$ [mm] と計算した。この L_1 についてはベンチキャリア間の距離計測は定規で行っており、0.5 [mm] 程度の測定誤差を含む。スクリーンに映し出された 0 次回折光が描画する像の長さ L については、スクリーン上にメモリを打つことにより測量可能にした。以上の 2 つのパラメータからカンチレバーの角度振幅 α は Eq. (4.2) によって計算できる。

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \frac{1}{2} \frac{L}{L_1} \quad (4.2)$$

分光素子の背後に設置したスピーカ (FF125 K, FW208N, FOSTEX, Japan) から分光素子に音圧を照射し、カンチレバーを振動させた。分光素子に照射する音圧の周波数を 200 [Hz] から 2000 [Hz] まで 10 [Hz] ずつ周波数を変化させていき、像の大きさが極大になった周波数を記録した。記録した周波数近傍で 1 [Hz] ずつ周波数を変化させ、極大となる周波数 (374 [Hz]) を記録した。この値はシミュレーション (391 [Hz]) とレーザドップラーによる実験 (395 [Hz]) で得られたそれぞれの共振周波数との差 (4 [Hz]) と比較して誤差 (15 [Hz]) が比較的大きい。しかしながらこの実験の主目的は回転ステージで得られる入射角走査範囲が音圧でも得られるか検証することであり、この系において最も角度振幅が大きくなる共振周波数を選ぶべきである。したがって、この実験ではスピーカから与える周波数として 374 [Hz] を採用した。実験の再現性を担保するために、カンチレバーに加わる音圧は、カンチレバーの横に設置したマイクロホン (MB-2200M10, Ono Sokki, Japan, Sensitivity: 14 [mV/Pa]) で計測し、信号はオシロスコープで記録した。音圧信号を Fig.4.8 に示す。音圧は計測された電圧からマイクロホンの感度を用いて計算した。音圧の信号はカンチレバーが単振動するのに必要な正弦波になっていることがわかる。さらに、各信号の peak to peak を計算することで音圧の振幅を計算した結果を Fig.4.8 に併記する。ただし、この範囲を超えて音圧を高めたところ、正弦波からのずれが顕著となったため、最大振幅を 34.1 [Pa] として実験した。次に 0 次回折光が描画する像の長さ L が角度振幅 $\alpha = 84.0$ [deg] となる大きさまでスピーカに与える電圧を増加させたところ、 $L = 230$ [mm] となり、音圧は 28.8 [Pa] となった。この音圧は音圧レベルに換算すると、 $20 \log_{10} \frac{28.8/\sqrt{2}}{20.0 \times 10^{-6}} = 120$ [dB] となる。この音圧レベルはジェットエンジンが発する騒音に相当する大きさ^{*7} であるが、本研究の実験系においてはスピーカをデバイス及びマイクに可能な限り近づけて実験を行っているため、十分に現実的な値であるといえる。

スクリーンに映る像はスクリーンに貼られたメモリ (1 [mm] 間隔) により計測しており、0.5 [mm] 程度の誤差を含む。したがって、角度振幅の測定では 0.7 [deg] の誤差が含まれる。この誤差は、Fig.4.6 の誤差よりも小さく、回転ステージの波形と音圧駆動による波形を比較する場合において許容できる誤差である。角度振幅 α が 84 [deg] であり、カンチレバーが対称に振動している場合、入射角の走査範囲としては $-21 \sim 21$ [deg] となる。これは 4.1 節で行った回転ステージによる入射角特性の計測よりも広い範囲を走査できることを意味している。したがって、本実験の目的である 4.1 節の実験と同じの入射角走査範囲 (-20 [deg] から 20 [deg])

^{*7} https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/noise/souon_1.htm

が音圧による駆動で得られることがわかった。

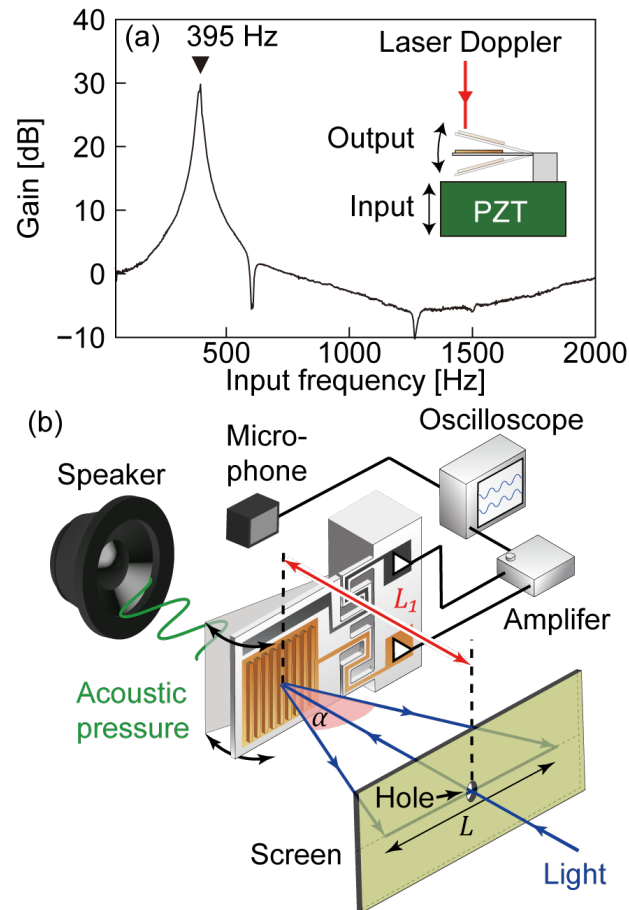


Fig.4.7: カンチレバーの機械的共振特性. (a) レーザードップラー振動計を用いた基板に対するカンチレバー先端の振幅ゲインプロット, (b) スクリーンに映る反射光の像の長さ L からカンチレバーの角度振幅 α を求める実験系の概念図

4.3 音圧によるプラズモニック光検出器の入射角特性の計測

音圧によってカンチレバーを共振させて、カンチレバー上の金回折格子への入射角を走査することで入射角ごとの光応答特性が得られるか検証を行った。金回折格子を利用した分光は、角度ごとの光応答性を利用して分光を行っており、MEMS カンチレバー上で角度ごとの光応答特性が得られれば、金回折格子を利用した方式でのオンチップ分光が可能になる。本実験では4.1節, 4.2節に引き続き、Fig.4.1の光学系を利用した。カンチレバーの面に光軸が垂直になるように自動回転ステージで初期入射角を 0 [deg] に変更し、分光素子の背面にスピーカを設置した。設置したスピーカから分光素子の背面に4.2節で与えたように 28.8 [Pa] の音圧を

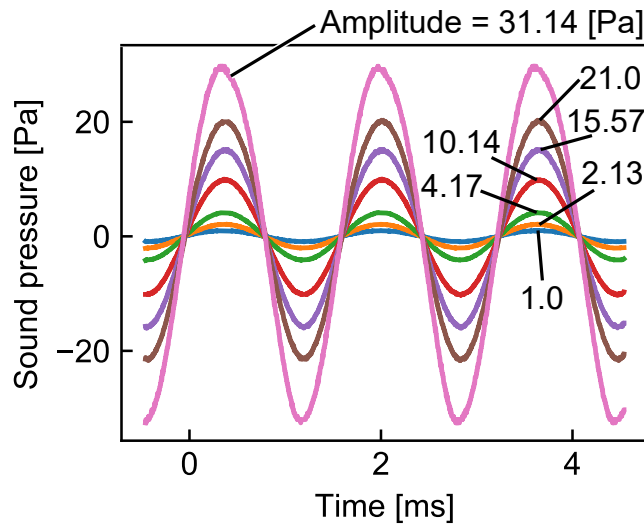


Fig.4.8: カンチレバーに加えられた音圧とその振幅

与え、 $-21 \sim 21$ [deg] の入射角走査を行った。分光素子の金回折格子表面に単色光を照射しながら、Fig.4.7(b) に示すように、マイクロホンからの音圧信号と分光素子からの光電流信号を同時にオシロスコープ (TBS 1052B-EDU, Tektronix, U.S.A.) で記録した。記録した光電流信号と回転ステージ走査による結果 (Fig.4.5) を比較するために、1 周期内の各時刻におけるカンチレバーの傾きを Fig.4.9(a)、信号の 1 周期を抽出した結果を Fig.4.9(b)-(f) に示す。なお、カンチレバーの内部には角度センサーは存在しない。したがって、マイクロホンから測定した音圧から (1 周期内での時刻) を決定した。Fig.4.5(f) ($\lambda = 1250$ [nm]) の光応答性は、入射角 20 [deg] 付近にピークがあることから、このピークは各周期の入射角が最大になる時刻 $T/2$ と $3T/4$ ($T = 1/f_c$) に位置すると考えられる。この $\lambda = 1250$ [nm] の位相を基準としてその他の波長に起因する波形の位相も決定した。

カンチレバーは 1 往復につき、走査範囲内の特定の入射角を 2 度通るため、Fig.4.9 の波形には、Fig.4.5 の波形の 2 周期分が実質的に含まれていることになる。したがって、位相の $T/4$ から $3T/4$ の範囲は、入射角の $-21 \sim 21$ [deg] の範囲に対応していることになる。Fig.4.5 の回転ステージでの結果と Fig.4.9 の結果を比較すると、音圧駆動の信号が若干歪んでいることがわかる。しかし、波形には回折次数 m で示される特徴的なピークが残っており、回転ステージを用いた光応答性のピークシフトと一致している。例えば、 $T/2$ 付近の $m = -3, +3$ に対応するピークの横方向の距離は、波長が長くなるにつれて大きくなっている。この挙動は、Fig.4.6 に示すような理論値および実験値による分散関係とも整合している。また、回折次数 $m = +3, -2$ 、または $m = -3, +2$ のピーク間の横方向の距離は、波長の増加とともに減少した。これらの傾向は、Fig.4.6 の理論や過去の実験結果とも整合している。回転ステージ走査と音

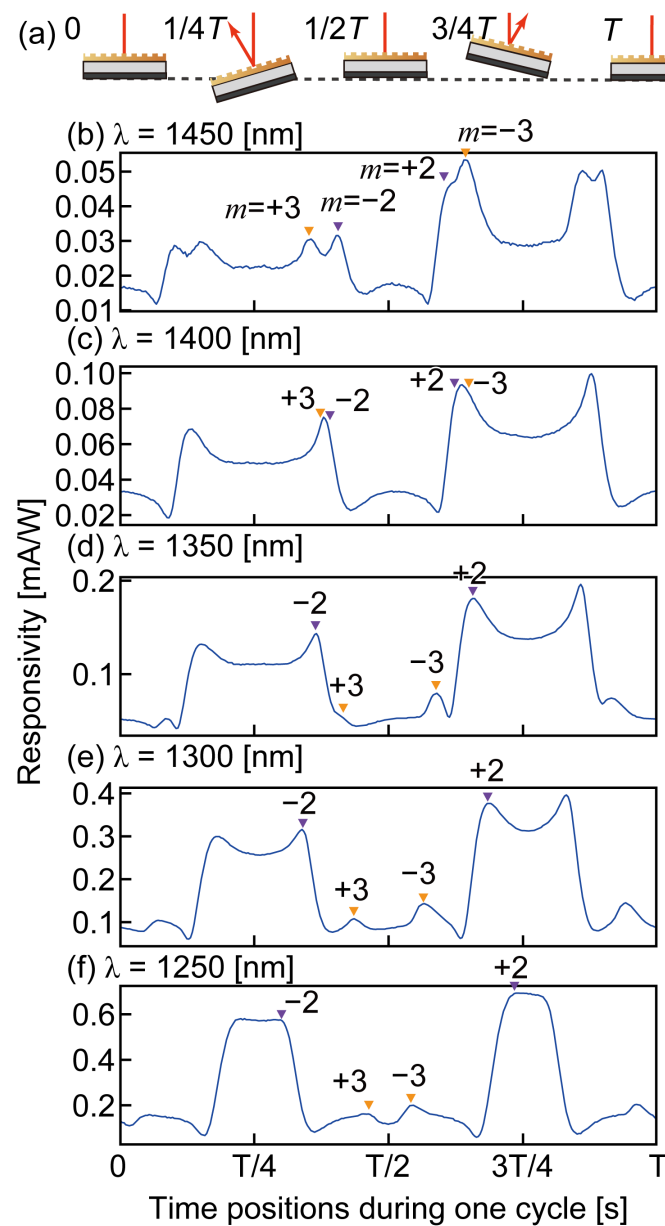


Fig.4.9: 音圧によるプラズモニック光検出器の入射角特性の計測. (a)1周期内での時間 T とカントレバーの傾きの関係, (b)~(f)5種類の入力波長から得られた光応答性

圧走査の波形を比較すると、音圧走査の波形に歪みが確認できる。この波形の歪みは、電流電圧変換アンプのカットオフ周波数やデバイス内因性のインダクタンスやキャパシタンスの要因による過渡現象に起因すると考えられる。中でも、電流電圧変換アンプは微小電流を増幅するために $10 \text{ [M}\Omega\text{]}$ もの大きなフィードバック抵抗を使用していたため、時定数が長くなってしまったことが最も大きな要因と考えられる。しかしながら、これらの問題は、周辺回路やカントレバー上のプラズモニック構造を最適化することで解消できると見込まれる。以上のことから、試作した素子が本研究の分光素子として、SPRの応答を電流計測しつつ、入射角を走査で

きることがわかった。次に、このデバイスを用いて、音圧駆動での分光を実施する。

第 5 章

音圧駆動による分光

本章では第 4 章で求めた分光素子の基礎特性を基にカンチレバーを音圧で駆動することによって入射スペクトルを導出する方法について述べる。まず、5.1 節では分光素子に入射しているスペクトルを確認するために、入射スペクトルを市販分光器によって求めた。次に 5.2 節では 4.3 節で信号のひずみの原因となっていた電流電圧変換アンプのカットオフ周波数とその高帯域化について述べる。分光素子が出力する信号が歪んだ場合、ピークの半値幅も広がり、分解能の低下につながるため対応する。5.3 節では、文献 [40] において実証されていた大型回転ステージを用いた分光法を、試作した分光素子でも実行可能か検証した。この実験では、製作したデバイスが原理的に分光機能を有するかを判別する指標を与える。最後に 5.4 節では試作した分光素子を音圧で駆動することで入射角走査を行うための拡張した分光計算方法を創出し、それを実際にダイナミックに振動する波形に適用して分光が行えるか検証した。また、分光器の分解能の評価についても述べる。

5.1 市販分光器による入射スペクトルの計測

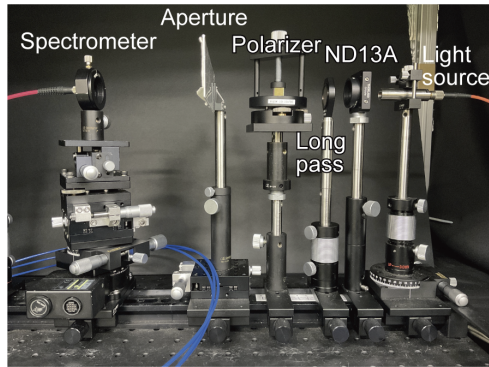
本節では分光素子に入射するスペクトルを市販分光器 (Sol2.2A, BWTEK, U.S.A) を用いて計測した結果について述べる。本実験の光学系を Fig.5.1(a) に示す。この光学系は実際に分光素子に入射しているスペクトルを計測するために 4.1 節で述べた Fig.4.1 の実験系において元々分光素子のあった場所に分光器の入力ファイバを設置した構成になっている。まず、波長可変光源から出力された光は光強度を減衰させる ND フィルタ (ND13A, ThorLabs, U.S.A.) を通して減衰した。これは市販分光器のダイナミックレンジが本研究の分光素子のダイナミックレンジよりも低く設定されており、本来の光強度で入力した場合に出力が飽和するため導入した。このフィルタの透過率は計測を予定している波長範囲 ($\lambda = 1230 \sim 1330$ [nm]) において平均で 2.5% であった*⁸。また計測範囲内において透過率の分散は $3.7 \times 10^{-3}\%$ であるため、ND フィルタによるスペクトル形状の変化はないものとみなせる。ND フィルタを透過した光は 4.1 節と同様にロングパスフィルタ・偏光子・アパーチャを通過し、分光器のファイバに入射した。

計測したスペクトルを Fig.5.1(b) から Fig.5.1(d) に示す。この図に示すとおりに計測されたスペクトルのピークは概ね全て指示した波長においてピークを持っており、波長可変光源から正常に光が出力されていることがわかった。実際に得られたスペクトルのピークと指示波長との誤差を計算した結果を Fig.5.2(a)、それぞれの差を取った結果が Fig.5.2(b) である。Fig.5.2(b) の平均をとると約 +3 [nm] になった。本研究の分光器から得られたスペクトルは指示波長を実際に入力した波長としているため本来のスペクトルから +3 [nm] ずれることになる。したがって本研究の分光器から得られたスペクトルについては波長を -3 [nm] 移動して補正した。

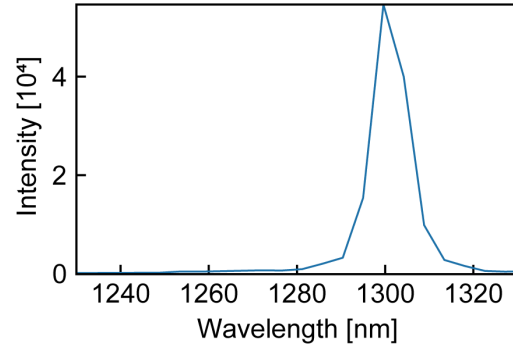
5.2 電流電圧変換アンプの高帯域化

この節では、4.3 節で問題になっていた光電流信号の歪の原因と考えられる電流電圧変換アンプ (IV アンプ) の高帯域化について述べる。まず IV アンプのカットオフ周波数を評価する回路を Fig.5.3 に示す。この IV アンプは 4.3 節とほぼ同じ構成になっているが、電流を入力するためにオペアンプの反転入力の前段に抵抗 R_{in} を設置している。この抵抗に電圧を

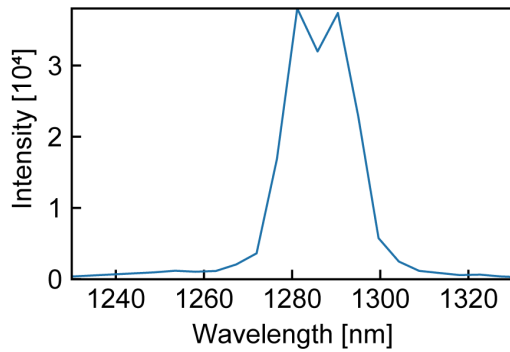
*⁸ https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=119&pn=ND13A にあるデータを基に計算した



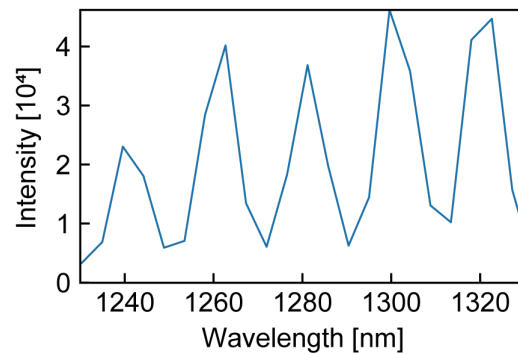
(a) 分光素子に照射される入射スペクトルを計測している様子



(b) 入射波長 $\lambda = 1300$ [nm] のスペクトル



(c) 入射波長 $\lambda = 1280$ and 1290 [nm] のスペクトル



(d) 入射波長 $\lambda = 1240, 1260, 1280, 1300$ and 1320 [nm] のスペクトル

Fig.5.1: 本実験の光学系 (a) と市販分光器 Sol2.2A で計測したスペクトル (b)-(d)

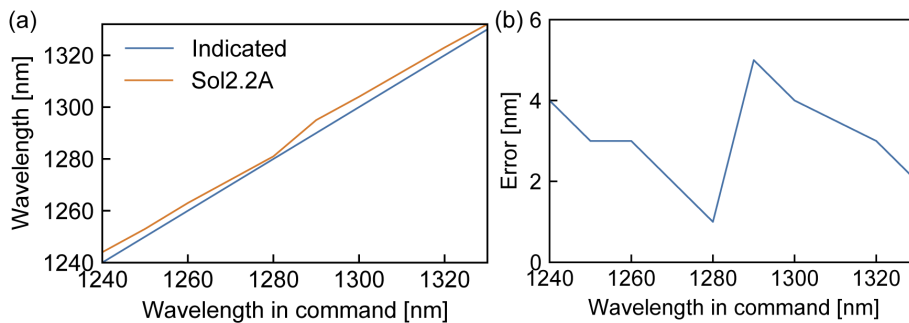


Fig.5.2: スペクトルのピークと指示波長の誤差

印加すると、非反転入力と反転入力はバーチャルショートしていると考えられるため、入力抵抗には $I_{in} = V_{in}/R_{in}$ の電流が流れていると考えることができる。本研究ではこの回路によって分光素子が出力する電流を擬似的に再現した。本実験では V_{in} に対して矩形波信号 (± 1 [V]) を与えて、IV アンプの立ち上がり時間を計測することでカットオフ周波数を求める。この回路

の R_f と C_f で形成されている並列部分はローパスフィルタを形成しているためカットオフ周波数 f_{BW} は Eq. (5.1) で表される。

$$f_{BW} = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (5.1)$$

さらに、立ち上がり時間 τ は Eq. (5.2) から近似的に求めることができる。

$$\tau \simeq \frac{0.35}{f_{BW}} \quad (5.2)$$

Eq. (5.1) から IV アンプのカットオフ周波数の理論値が求められ、Eq. (5.2) から実験によって求めた立ち上がり時間からカットオフ周波数が求められる。

Eq. (5.1) からわかるカットオフ周波数をより高くする戦略として以下の2つが考えられる。

1. R_f を小さくする。カットオフ周波数は高くなるが、増幅率も小さくなる。
2. C_f を小さくする。カットオフ周波数は高くなるが、小さくしすぎると回路が発振したり、リングングが発生する。

そこで、本実験では 4.3 節で使用した IV アンプの位相補償用容量を $C_f = 1$ [pF] とすることでカットオフ周波数を向上させて、光電流信号の歪を解消する。4.3 節で使用した IV アンプはターミナルブロックを使用して R_f や C_f を付け替られるように設計されていたため、 C_f を 3.7 [pF] から 1 [pF] に換装した。この場合の帯域幅の理論値は Eq. (5.1) を用いておよそ 16 [kHz] と計算できる。次に Fig.5.3 の回路 ($R_m = 10$ [M Ω]) を用いて立ち上がり時間を計測したところ 50 [μ s] となった。この結果から Eq. (5.2) を用いるとカットオフ周波数は約 7 [kHz] と計算できるが、理論値とは約 2 倍の差がある。この結果についてはターミナルブロックに寄生容量が発生しており、ダンピングが発生してしまったことが原因であると考えられる。したがって、IV アンプのカットオフ周波数をより高くするためにターミナルブロックを外しそのまま基板にはんだ付けを行った結果、立ち上がり時間は Fig.5.4 に示すとおり 22 [μ s] となった。これは Eq. (5.2) を用いてカットオフ周波数を計算するとおよそ 16 [kHz] となり理論値通りの周波数を得ることができた。したがって、本実験の構成の IV アンプを用いることで光電流信号の歪を軽減できる。

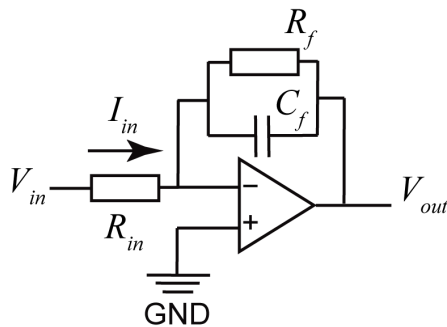


Fig.5.3: 電流電圧変換アンプの立ち上がり時間評価用の回路

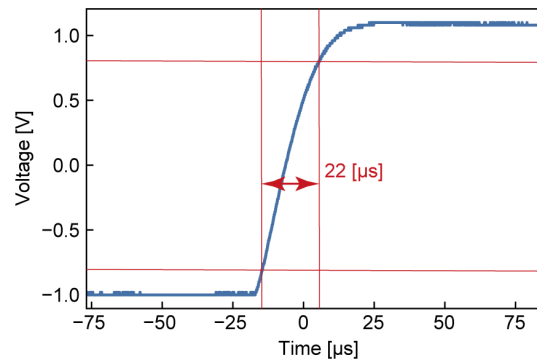


Fig.5.4: 電流電圧変換アンプの立ち上がり時間

5.3 回転ステージによる角度走査を利用した分光

試作した分光素子が入射角によってその光応答性を変化させるか確かめるために、Fig.4.1の光学系を用いて光学特性を計測した。まず、分光素子は金回折格子の溝が回転ステージの回転軸と平行になるように設置した。TM 偏光の近赤外光を分光素子のカンチレバーに対して垂直になるように波長可変光源 (SC450-27, Fianium, U.K.) から入射した。分光素子が出力する光電流を 5.2 節の電流電圧変換アンプで電圧に変換し、その信号をソースメータ (6242, ADCMT, Japan) で計測した。分光素子と電気回路の両方をアルミニウム製のシールドボックスに組み込み、外部ノイズからシールドした。シールドボックスの前面には、分光素子に光を取り込めるように穴を開けた。4.3 節で示した角度走査範囲 (Fig.5.5(c)) の場合、同じ入射角に複数の次数のピークが存在し、解を一意に特定できない構成になっていた。実際に Fig.5.5(c) の範囲で分光を行った結果が Fig.5.5(d) のスペクトルであり、青線が本研究の分光素子による結果で、橙線が市販分光器 (Sol2.2A, BWTEK) による結果である。Fig.5.5(d) では明らかに入射した波長以外のピークが計測されており、それぞれのピークの本数は本研究の結果が 8 個、市販分光器の結果では 2 個と大きく異なっている。したがって、Fig.5.5(c) の範囲で分光を行った結果 (Fig.5.5(d)) では分光ができているとは言えない。

そこでこの実験では Fig.5.5(b) の角度走査範囲 (19~39 [deg]) に限定し、分光の対象とする波長域を 1230~1330 [nm] に限定することで波長と入射角の関係を一対一対応にして、本研究の分光素子における分光計測を実現する。そこで回転ステージで入射角を 19 [deg] から 39 [deg] まで走査しながら、ソースメータで分光素子の光応答性を 0.2 [deg] ごとに測定した。

入射波長が 1230 [nm]~1330 [nm] の範囲で、10 [nm] ごとに光応答性を計測した。なお、出

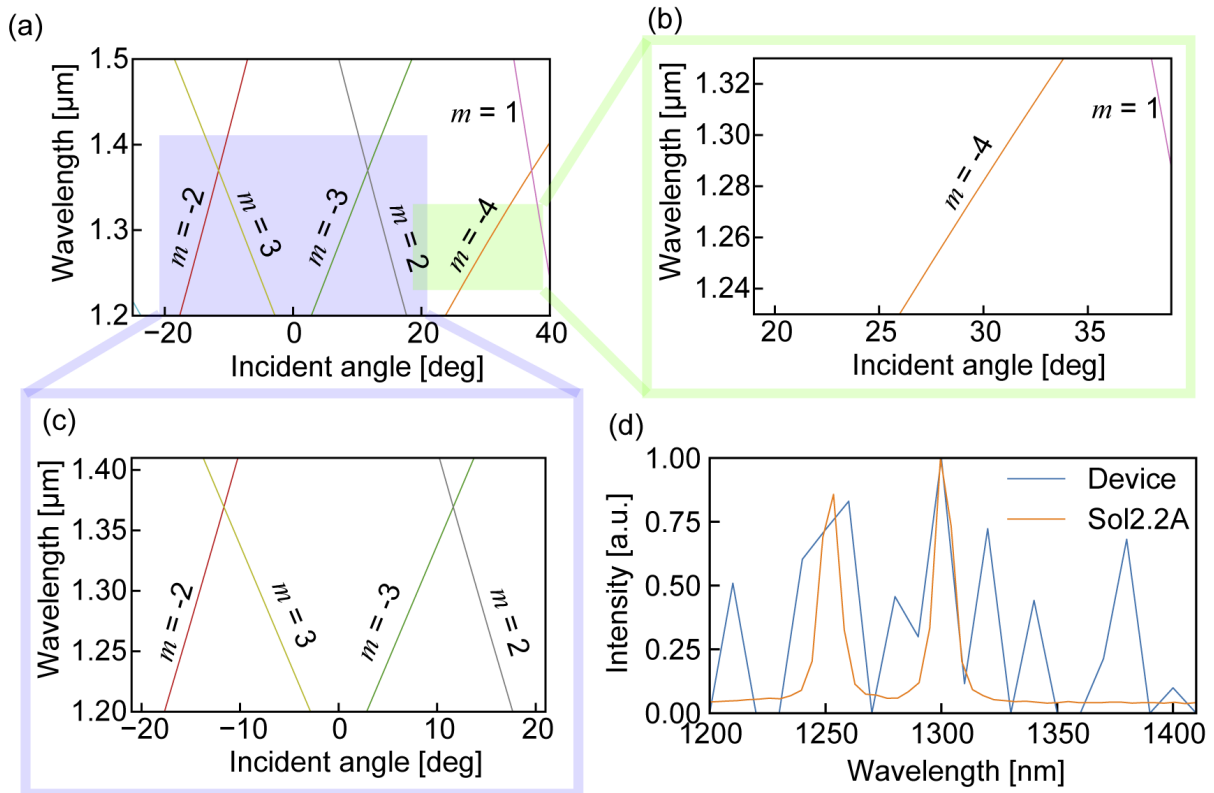


Fig.5.5: (a) 本研究で使用した分散関係全域. 青色で示している領域が第4章で扱った波長-入射角範囲. 緑色で示している領域は本節の分光において扱う波長-入射角範囲. (b) 本章の分光で使用した分散関係. (c) 第4章で扱った分散関係. (d) 青色で示している波長-入射角範囲のデータを用いて分光したスペクトル. 2つの単色光 ($\lambda = 1250$ and 1300 [nm]) を同時に入射して計測したが、本研究の分光素子から得たスペクトルと市販分光器の結果が一致しない

力した単色光の光強度及びスペクトルはパワーメータ (S122C, Thorlabs, U.S.A) でも計測した。分光素子の入射角ごとの光応答性を Fig.5.6 に示す。Fig.5.6 を見ると、入射波長ごとに異なる入射角でピークが発生していることがわかる。この結果は、典型的な SPR 応答を示しており、分散関係の理論式 (Eq. (2.7)) において、回折次数 $m = -4$ の計算結果と整合している。次に代表的な入射角に素子を固定して、波長を掃引したときの光応答性を Fig.5.7 に示す。Fig.5.7 を見るとそれぞれの光応答性は互いに異なる波長にピークを持つことがわかる。以上の実験結果から、製作した分光素子のプラズモニック光検出器は、入射角に応じて光応答性を変化させることがわかった。これは、分光を実現する上で必要な条件であり、基本的な要求を満たすものであった。

次に試作した分光素子への入射角を回転ステージによって走査することで分光ができるか確認するために実験を行った。この実験は Fig.4.1 の光学系上で行われ、Fig.5.6 の光応答性を応

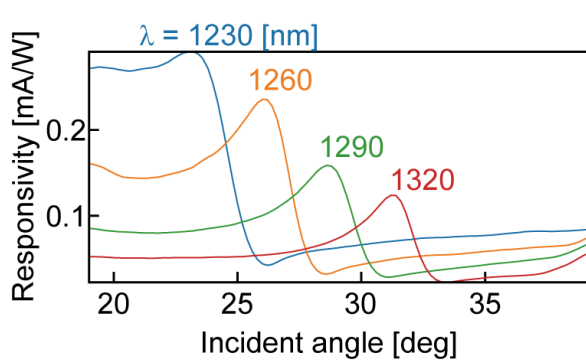


Fig.5.6: 自動回転ステージを用いた入射角走査によって計測された入射角ごとの光応答性

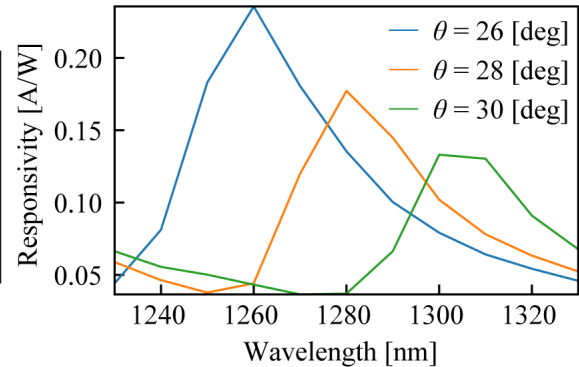


Fig.5.7: 自動回転ステージを用いた入射角走査によって計測された光応答性

答性行列 (Eq. (2.13)) として採用した。なお、応答性行列の計測の際には、ここで示した以外の波長、すなわち 1230 [nm] から 1330 [nm] までを 10 [nm] おきに単色光照射に対する応答性を計測した。この応答性行列を利用して、実際に以下の単色光の組み合わせに対して分光を実施した。単色光の組み合わせ ($\lambda = 1250$ and 1290 [nm]) を光源から分光器の金回折格子に照射した。自動ステージで入射角を 19 [deg] から 39 [deg] まで 0.2 [deg] ずつ走査しながら、各入射角における光電流信号をソースメータで記録した。この電流信号と応答性行列から Fig.5.8 に示す入射スペクトルを計算した。このグラフにおいて青線は本研究の分光器によって計測したスペクトルで橙線は市販分光器によって計測したスペクトルである。市販分光器の結果は 5.1 節と同じ方法で求めた。Fig.5.8 において市販分光器と本研究のものを比較すると、ピーク波長に若干の誤差があるものの、同様のスペクトルを再現できていることがわかる。また、Fig.5.8 を見ると各スペクトルのピークの数も 2 つと同数であり、ピーク間の誤差も 5 [nm] 以内に収まっていることがわかる。以上の結果から、今回試作した分光素子に組み込まれているプラズモニック光検出器を用いた入射スペクトル計測が可能であることがわかった。

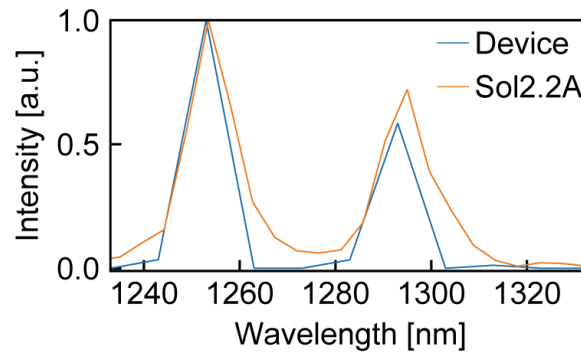


Fig.5.8: 自動回転ステージを用いた入射角走査によって計測された光電流信号から計算したスペクトル

5.4 音圧による角度走査を利用した分光

音圧によるカンチレバーの変形を利用した入射角走査によって、素子の光応答性を変化させて分光を実現する方法について述べる。音圧駆動時の分光を行うための、電流信号をまず各波長に対して測定した。その際に、分光に有利な角度である、 29 [deg] 近傍で電流信号を記録した。そのために、まず、Fig.5.9 に示すとおりに分光素子を手動回転ステージによって初期入射角が 29 [deg] になるように回転させた。

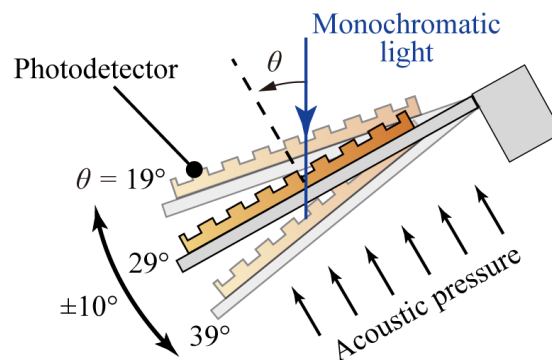


Fig.5.9: 初期角度を 29 [deg] にした場合の音圧によるプラズモニック光検出器の入射角走査の様子

これはカンチレバーを音圧により ± 10 [deg] 駆動することで入射角の走査範囲において 5.3 節での実験を再現する狙いがあった。分光素子の背面には外力としての音圧を供給するスピーカ (FF125 K, FW208N, FOSTEX, Japan) を設置した。背面のスピーカはカンチレバーと平行になるように配置した。実験の再現性を確保するために第 4 章の実験と同様に分光器の近くには小型マイクロホン (MB-2200M10, Ono Sokki, Japan) を設置し、スピーカから供給される

音圧を計測した。カンチレバーが図 5 のように ± 10 [deg] の入射角走査を行うように、スピーカに与える電圧の振幅を調整した。このときに得られた音圧の振幅は 6.8 [Pa] で、振動数は 375 [Hz] あった。次に光源から単色光を分光器の金回折格子に照射しながら、分光器が出力する光電流信号を電流電圧変換アンプで電圧に変換し、オシロスコープ (TBS 1052B-EDU, Tektronix, U.S.A.) で記録した。このとき、入射波長は 1230 [nm] から 1330 [nm] までを 10 [nm] 刻みでそれぞれ照射した。またマイクロホンから得られた音圧信号も同時にオシロスコープで記録した。単色光を入射したときの光電流信号を Fig.5.10(b) に示す。カンチレバーは正弦波の音圧で共振しているため、Fig.5.10(a) に示すように、1 周期で入射角を 19 [deg] から 39 [deg] まで 2 回走査する。したがって、1 周期を T [s] とすると、19 [deg] から 39 [deg] までの角度走査は、位相 (1 周期内での時刻) が $0 \sim T/2$ の範囲に相当する。4.3 節で示した角度走査範囲の場合、同じ入射角に複数の次数のピークが存在し、解を一意に特定できない構成になり、入射スペクトルを計算できなかった。この実験で設定している走査範囲の 19~39 [deg] を選定した場合、波長と入射角の関係を一対一対応にできる。試作した分光素子を音圧で駆動し、得られた光電流信号を利用した分光が可能か検証を行った。この実験では応答性行列として Fig.5.10(b) のデータを用いた。まずは応答性行列を計測した波長範囲 (1230~1330 [nm]) において入射スペクトルを得られるか検証を行った。単色光の組み合わせ ($\lambda = 1250$ and 1290 [nm]) を分光器に入力し、音圧でカンチレバーを共振させながら、分光器が出力する光電流信号をオシロスコープで記録した。また、これらのスペクトルは、市販分光器でも計測した。Fig.5.11 にこれらの信号と応答性行列から、計算した入射スペクトルを示す。

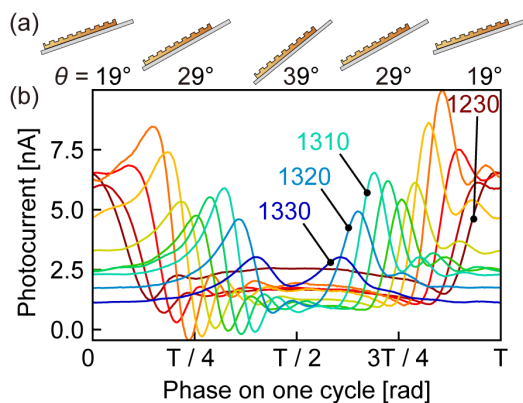


Fig.5.10: 1230~1330[nm] の波長域における音圧を用いた入射角走査による光電流信号の測定

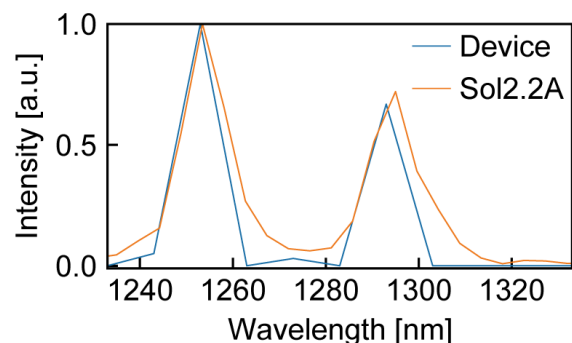


Fig.5.11: 単色光 ($\lambda = 1250, 1290$ [nm]) の組み合わせを入力した場合の音圧走査によって得られた光電流信号から計算したスペクトル

なお、カンチレバーには、入射角を決定する角度センサが現時点では組み込まれていないため、スペクトルの計算には、入射角の代わりに光電流の1周期内での位相を用いた。Fig.5.11の青線は、本研究の分光素子で計測したスペクトルで、橙線は、市販分光器 (Sol2.2A) で計測したスペクトルである。市販分光器と本研究のものを比較すると、Fig.5.8でも見られたとおり、市販分光器のスペクトルが示すピーク波長と本研究の分光素子のピーク波長に若干の誤差が確認できる。この誤差は、光源から特定の波長を AOTF (Acousto-Optic Tunable Filter) によってフィルタする際に与える指示波長と実際に出力される波長の誤差が原因であると考えられる。AOTFは与えた信号の周波数によってその透過波長を変化させる。指示波長から与えるべき周波数の計算は3次関数 (Eq. (4.1)) のフィッティングによって行われており、この計算において指示波長と出力波長に誤差が発生していると考えられる。しかしながら本研究の分光素子と市販分光器の各スペクトルのピークの数と同数であり、ピーク間の誤差も5 [nm] 以内に収まっていることから、市販分光器のスペクトルの再現には成功しているといえる。したがって以上の結果より、本研究の分光器は応答性行列を計測した波長範囲において市販分光器と同等の入射スペクトルを計測可能なことがわかった。

最後に提案した分光器の波長分解能を評価した。 $\lambda = 1270$ and 1290 [nm]、 $\lambda = 1280$ and 1290 [nm] の2つの単色光の組み合わせを入力した。これまでの実験と同様の手順で光電流信号を計測し、スペクトルを計算した。本研究の分光器で得たスペクトルを青線、市販分光器で得たスペクトルを橙線として Fig.5.12 に示す。Fig.5.12(a) を見ると 20 [nm] 離れた2つのピークを識別できていることがわかる。一方、ピークの間隔が 10 [nm] のときは、Fig.5.12(b) に示すように、スペクトルの2つのピークが融合してしまい、分離できなかった。この結果から、本研究の分光素子の波長分解能は実験的には 20 [nm] であることがわかる。一方、市販分光器 (橙線) で得られた2つのピークもほとんど区別できていないことから、本研究の分光素子は市販分光器に匹敵する波長分解能を持っていると結論付けられる。以上により、動的な駆動で分光する技術を確立した。そこで、さらに当初の目的であった、受光面に組み込み可能な構成が可能な静電駆動による分光機能の確立に取り組んだ。

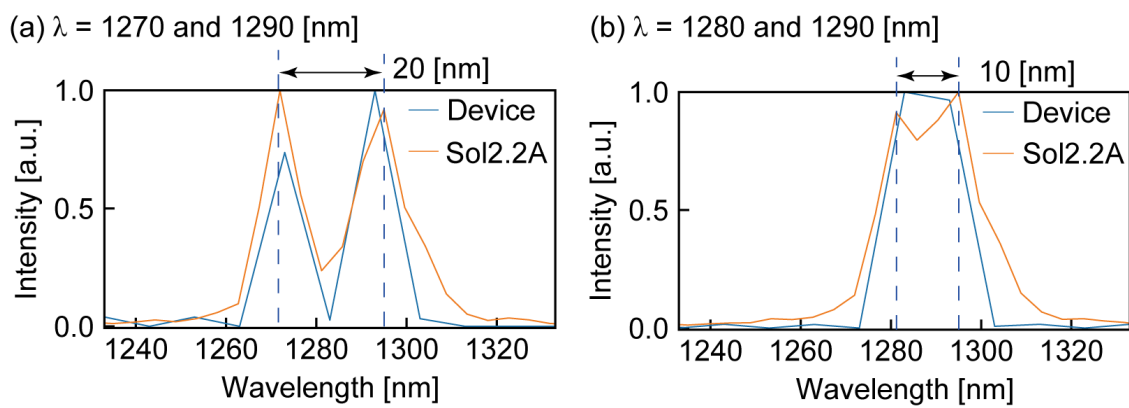


Fig.5.12: (a) 分離可能もしくは (b) 分離不可能な2つの単色光の組み合わせを入力したときに計測されたスペクトル。青線は本研究の分光素子、橙線は市販分光器 (Sol2.2A, BWTEK) から得た。

第 6 章

入射角走査機構の静電駆動化

本章では本研究で提案した分光素子を第 4 章や第 5 章のように音圧ではなく、静電力によって駆動する方法とその実験結果について述べる。音圧による入射角走査はスピーカなどの外部に音圧を発生させる装置に依存しており、システム全体での小型化は困難であった。本研究の分光素子のような Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) デバイスではシステム全体として小型化できる駆動力として静電力が広く用いられている。特に櫛歯型の MEMS ミラーによる入射角走査 [64–66] は盛んに研究されており、本研究の分光素子にその機構を取り込むことができればさらなる小型化が期待できる。本章では原理的に静電力を用いた入射角走査が行えるか検証を行い、静電引力による光電流計測への影響を調べた。

6.1 外部電極での静電駆動による入射角走査

静電力による入射角走査が原理的に可能か検証するために、Fig.6.1(a)に示すカンチレバーの外部に電極が設置された構造を提案する。入射角走査を行う静電アクチュエータとしては、年吉らの櫛歯型 MEMS ミラーが [64–66] 存在するが、構造が複雑であり、実施は困難である。本研究では、静電駆動と分光計測を組み合わせた時の信号処理方法を構築することに注力するために、カンチレバー上に電極を設け、その間に生じる静電力による駆動を実施した。

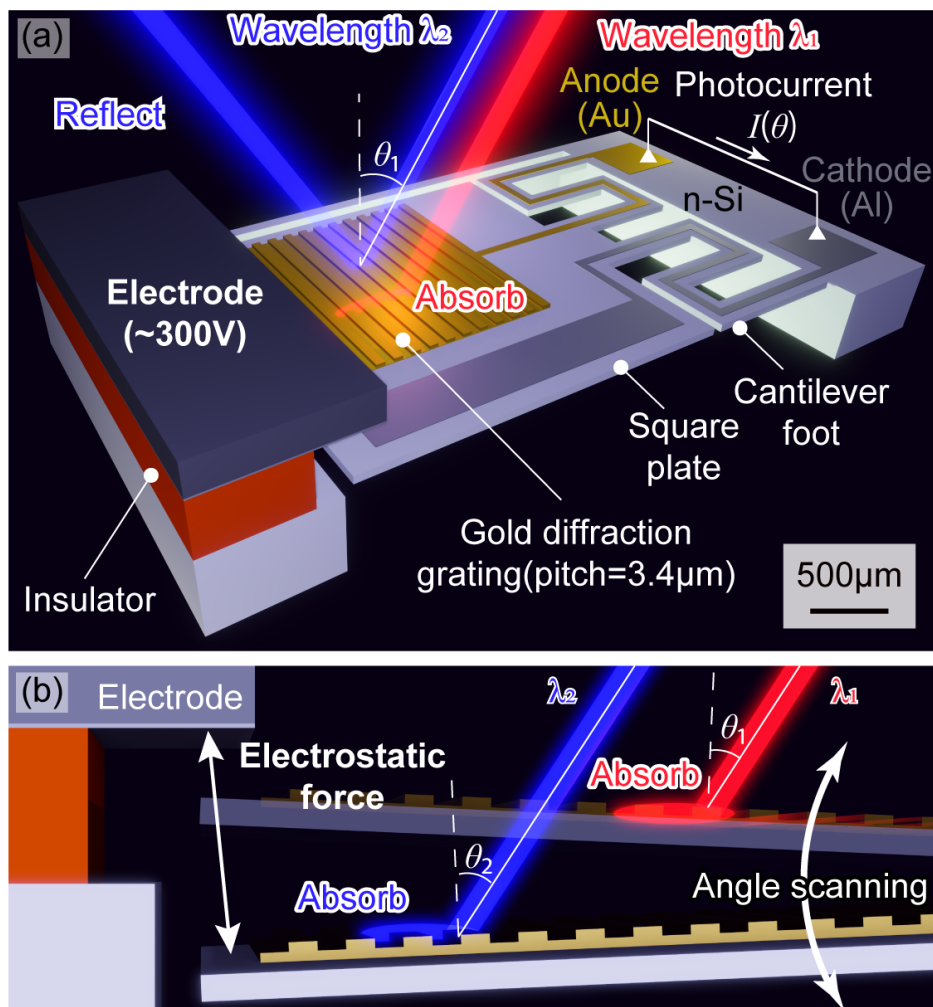


Fig.6.1: 外部電極による入射角走査機構の静電駆動化. (a) 俯瞰図 (b) 側面図.

電極とカンチレバーとの間に電圧を印加することで静電引力を発生させ、カンチレバーを共振させる Fig.6.1(b)。カンチレバー上の金回折格子は入射角に対応した波長を吸収し、その強度を光電流として出力する特性を持っているため、静電引力による入射角走査が行われることで入射スペクトルを求めることができる。次に Fig.6.1 の構造を実現させるために構築した実

験系を Fig.6.2(a) に示す。

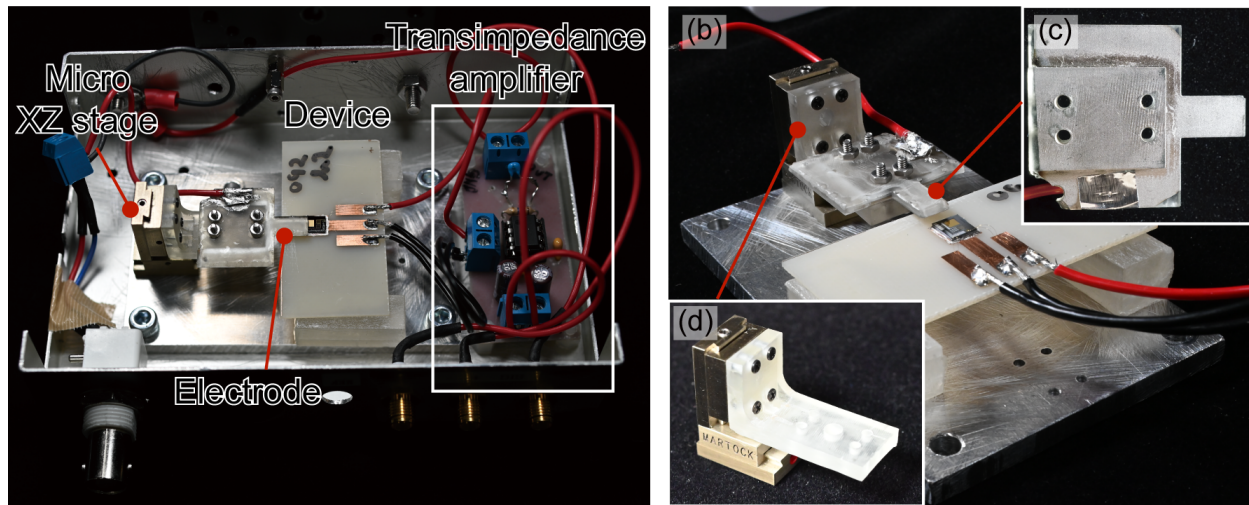


Fig.6.2: (a) シールドボックス内に設置されている分光素子、電極及び電流電圧変換アンプ (b) ステンレス板に固定されている分光素子及び外部電極 (c) 外部電極の裏側、Al が蒸着されている。 (d) 小型 XZ ステージ (MDE268, Elliot Scientific, Australia)

この実験系は主に分光素子と電極からなっており、電極は小型 XZ ステージ (MDE268, Elliot Scientific, Australia) 上に設置されていた。電極と分光素子との距離はこの小型 XZ ステージで調節する。静電力を使用して MEMS デバイスを操作する場合に頻繁に発生する現象として、電極と MEMS デバイスが近づきすぎて接触した後に張り付くという現象がある。この現象を避けるため XZ ステージによって電極の位置を微調整できるようにした。Fig.6.2(a) にある通り、これらのパーツはすべてアルミニウム製のシールドボックス内に格納できるようになっている。分光素子と電極及び小型 XZ ステージは一枚のステンレスの板 (厚さ 5mm) にネジ止めされており、相対位置が固定されている。さらに Fig.6.2(b) のようにシールドボックスから独立して運搬可能になっている。電極は 3D プリントされたレジン上に真空蒸着器でアルミニウムを蒸着することで構築した (Fig.6.2(c))。ステンレスの板に固定されている各要素を横から観察すると Fig.6.3(a) の構成となっている。

カンチレバーが電極からの静電引力により、入射角走査を行うか検証するために Fig.6.3(b) の実験系を構築した。Fig.6.3(a) の視点から高速度顕微鏡 (VH-Z50L, Keyence, Japan) で観察することでカンチレバーと電極の位置関係を確認できる。さらに電極にはピエゾドライバ (M-2620A, Mess-tek, Japan) が接続されており、最大 300 [V] の電圧を印加できる。電極の位置を Fig.6.3(d) に示すとおり XZ ステージで位置関係を調整し、ピエゾドライバから 0~300 [V]、364 [Hz] の電圧 (正弦波) を印加した。その結果、カンチレバーは入射角走査を行

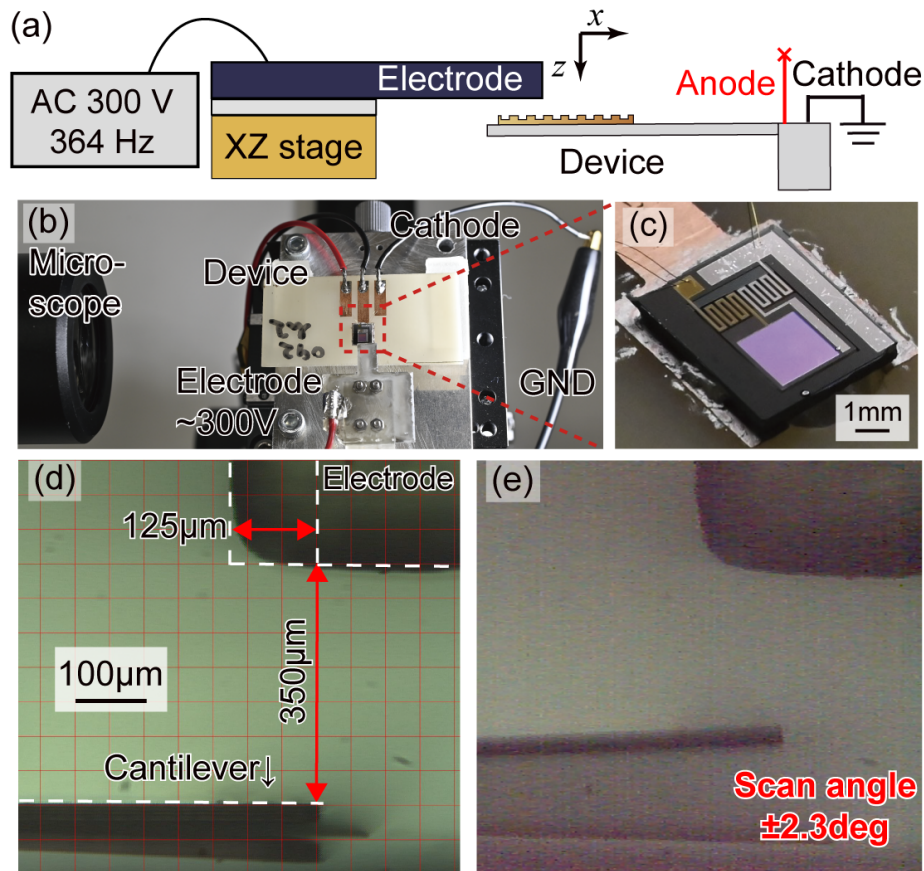


Fig.6.3: 分光素子の静電駆動を側面から顕微観察する実験系. (a) 実験系の概念図 (b) 実験系を真上から撮影した写真 (c) 使用した分光素子 (d) 電極とカンチレバーの先端の位置関係 (e) カンチレバーが振動している様子

い、高速度顕微鏡によって撮影した映像から入射角の角度振幅を計算した結果 ± 2.3 [deg] となった。したがって、この結果から Fig.6.3(a) の系で 3.1 節で述べた仕様 3 (± 2.3 [deg] の角度走査を行う) を満たす静電駆動が可能だとわかった。

6.2 静電駆動時における光電流信号の計測及び分光計測

本節では 6.1 節において述べた静電駆動機構を用いて角度走査を行い、静電駆動している分光素子が入射スペクトルを得られるか検証を行う。本研究の分光素子を静電駆動すると、分光素子上の光検出器に電圧が印加され、光入力に起因しない電流 (静電駆動に起因する電流) が素子から出力される。この電流は計測の妨げとなるため本研究ではこの電流を差動増幅器等を用いて電気回路的に除去した。以下では詳細な実験の手順について述べる。Fig.6.3(a) の系はステンレス板によって相対位置を固定されており、その相対位置のままシールドボックス内に

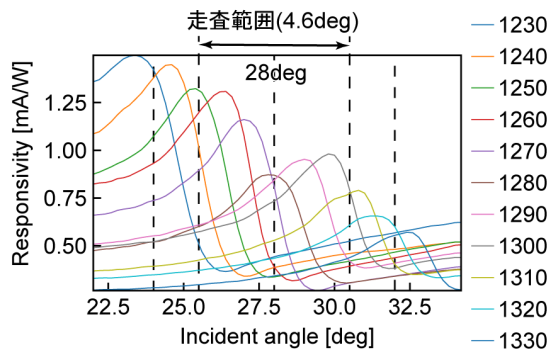


Fig.6.4: 回転ステージによる入射角走査で得られた入射角ごとの光応答性

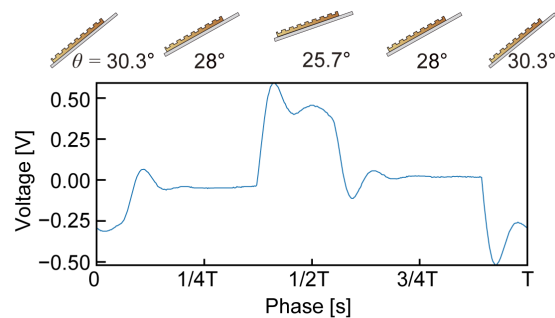


Fig.6.5: 静電駆動に起因する信号

固定した (Fig.6.2(a))。分光素子を電流電圧変換アンプに接続し、シールドボックスを 4.1 節の Fig.4.1(b) の実験系内に設置した。まず、この状態で回転ステージによって入射角ごとの光応答性を取得した結果が Fig.6.4 である。

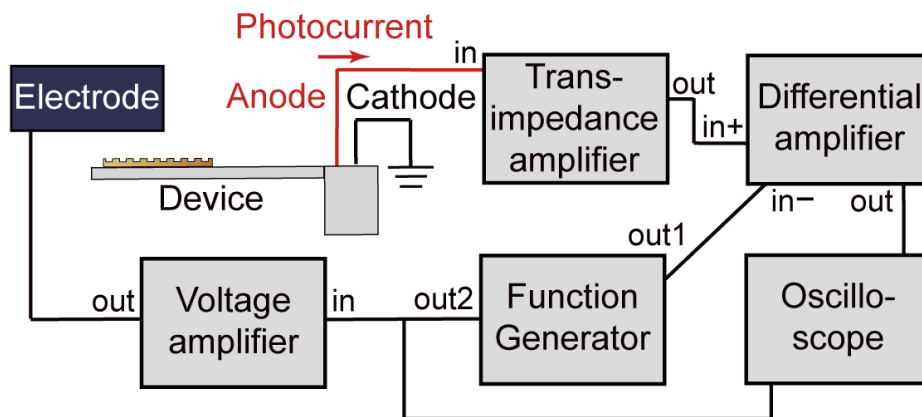


Fig.6.6: 静電駆動に起因する信号を除去する回路

この結果をみると SPR 特有のピークシフトが確認できており、この系において SPR を計測可能であることがわかった。次に初期入射角を手動回転ステージで 28 [deg] に調整し、ピエゾドライバから 0~300 [V]、364 [Hz] の電圧 (正弦波) を印加し、カンチレバーを静電駆動した。この時、分光素子には光を入力していなかったが、電流電圧変換アンプからは Fig.6.5 の信号が計測できた。これは電極により光検出器に電圧が印加された結果発生したものと考えられる。この信号の振幅は分光素子が通常出力する信号よりも 10 倍程度大きく、計測した光電流信号が埋もれてしまう。したがって、Fig.6.6 の回路によって静電駆動に起因する信号を除去した。Fig.6.6 は基本的には光を当てているときの信号から光を当てていないときの信号を電気回路的に差を取ってオシロスコープで記録する構成になっている。



Fig.6.7: ピエゾドライバ (M-2620A, Mess-tek, Japan, Left) 及びファンクションジェネレータ (AFG-2105, GW Instek, Taiwan, Right)

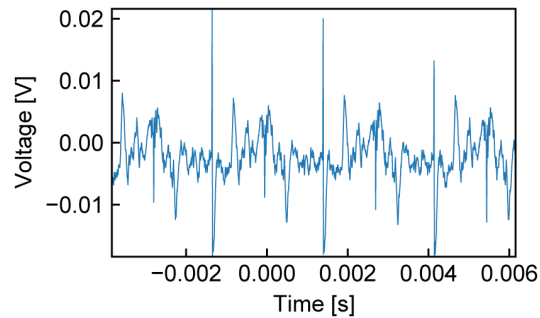


Fig.6.8: 静電駆動に起因する信号を差動増幅回路により除去したときの暗電流

実際に Fig.6.6 の回路で無入力時の信号を得た結果が Fig.6.8 と成っており、約 0.02 [V] の振幅を持っていることになる。これは実際に分光素子が出力する信号と比較して無視できる値である。次に金回折格子に対して 1260nm から 1300nm までの単色光を照射しながら、カンチレバーの静電駆動を行い、差動増幅された信号をオシロスコープで記録した。Fig.6.6 の系から得られた各位相（1 周期内での時間）の静電駆動に起因する信号が除去された応答性を Fig.6.9 に示す。

また、各位相に対応するカンチレバーの振動の様子を図上部に示す。Fig.6.9 を見ると明らかに静電駆動に起因する信号の波形は除去されていることがわかる。また、入射角ごとに吸収する波長が異なるという金回折格子の特性も再現できており、静電容量と光電流の同時測定を実現できた。最後に、取得した波形から分光計測を行った。光源から 2 つの単色光 ((a) $\lambda = 1260$ and 1290nm, (b) $\lambda = 1250$ and 1290nm) を入射し、分光計測を行った結果を Fig.6.10(a)(b) に示す。図中の青線は本研究の光検出器によるものであり、橙線は市販分光器による計測結果である。Fig.6.10(a) の結果では本研究の素子から得たスペクトルは 1260 および 1290 [nm] でピークを取っていることがわかる。ただし、1240 [nm] においてスペクトルは上昇しているが、1240 [nm] の両側においてその値よりも低い値を取っていないため、ピークと見做さない。したがって、Fig.6.10(a) の結果では双方のスペクトルが持つピークの数と同数であり、本研究の分光素子による結果と市販分光器の結果は一致したと言える。また、Fig.6.10(b) の結果についてもピークの数的一致していることから、本研究の方法によって市販分光器の結果を再現できていると結論づけられる。以上により、本研究の分光素子は、静電駆動による角度走査を用いた状況であっても、分光を実施する能力を持つことが確認できた。

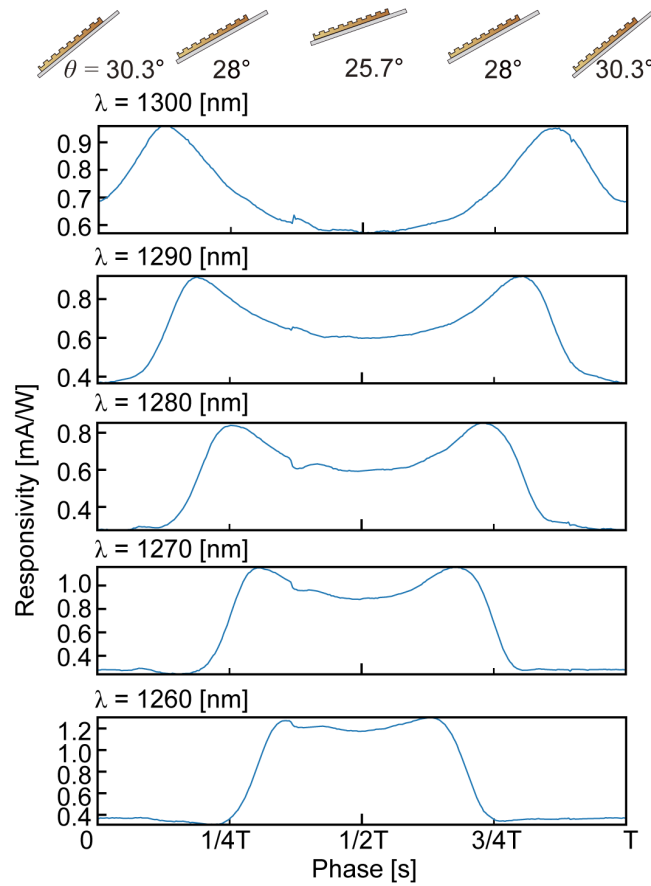


Fig.6.9: 計測した光電流信号 $I(\theta)$ から静電駆動に起因する信号を除去して計測した光応答性

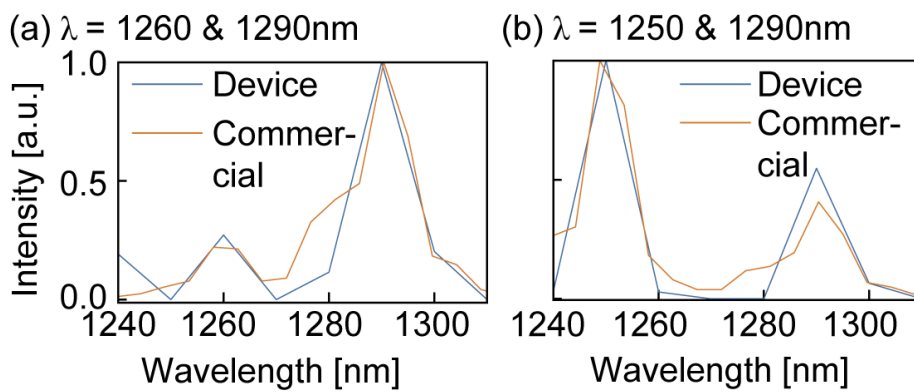


Fig.6.10: 静電駆動による入射角走査によって得られた光電流信号から求めた入射スペクトル

第7章

結論

7.1 本論文のまとめ

本論文では、RGB 撮像素子への組み込みを目指した角度走査型プラズモニック光検出器による近赤外分光素子を提案した。RGB 撮像素子に近赤外分光器を画素として組み込むことができれば、通常の撮像素子は搭載できるが、分光イメージャが搭載できなかったデバイス上での RGB 像と近赤外分光像の同軸・同時撮影が可能になる。例えば、カプセル内視鏡において腫瘍部位を近赤外分光イメージングで発見し、その検出部位の表面を可視像で記録することが可能になる。また、スマートグラス等のスマートデバイス上への搭載も可能になり、例えば、食料品の内部に存在する異物を視覚にオーバーレイして表示する技術への応用が期待できる。従来型の分光イメージャは多くの面積を専有するハーフミラー方式やフィルタアレイ方式があったが、これらの技術では小型化に限界があった。そこで、Fig.1.2 に示すように通常の RGB 撮像素子の画素内に分光器を組み込むという方法が考えられるが、従来型の分光器では画素内への組み込みは困難であった。従来型の分光器は複数の光検出器もしくは受光部周辺に静電駆動機構が必要であり、画素内に集積させるのは困難であった。以上の問題を解決するための有望な候補として、金回折格子型プラズモニック光検出器を用いた分光法が挙げられる。この方法であれば、単一の光検出器のみを用いており、さらに Fig.1.9 に示すように光検出器の背面に駆動用電極の垂直統合できるため、画素として集積する際に重要な面内のデッドスペースを削減できる。しかしながら、この金回折格子を利用した方式は現時点では入射角の変化を大型回転ステージによって行っており、実用化のためにはこの角度走査機構のオンチップ化が必要となっていた。

そこで本研究では金回折格子型プラズモニック光検出器への入射角を走査するための機構を

オンチップ化し、実際に分光が可能か検証を行った。本研究ではまず静電駆動に起因する影響を除外して計測を行うために電流計測に干渉しない音圧を角度走査のための駆動力として採用した。

本研究の分光素子は n 型 Si のカンチレバー上に金回折格子を形成した構造になっており、音圧によってカンチレバーが共振し、金回折格子に対する入射角走査が行われる。第 2 章では分光素子の動作原理と素子が出力する信号について詳細に述べた。

第 3 章では、分光素子本体についての設計論及びその製作について述べた。金の膜厚やカンチレバーの寸法などは 3.1 節で詳細に述べた。カンチレバーの形状については様々な寸法を持つものを製作し、実際に製作可能かつ共振周波数が最も低い構造を採用した。3.5 節では提案機構の設計から必要となる製作工程を決定し、分光素子の製作過程を述べた。製作工程は主に Fig.3.7 に示される通り、大きく 4 つの段階(回折格子の形成 (3.7 節)・金属の蒸着と成形 (3.8 節)・カンチレバーの成形 (3.13 節)・カンチレバーを固定する層の除去 (3.14 節))に分かれる。特に金属の蒸着と成形については困難を極めたため発生した問題について詳細に述べた。また、提案機構の PCB 基板への実装やワイヤボンディング方法 (3.15 節) についても本研究特有の問題に触れながら述べた。

第 4 章では分光素子の入射角ごとの光応答性などの基礎特性について計測した結果について述べた。分光素子は主に光検出特性と機械的特性を併せ持っているため、まずは個別に評価を行い。最終的にカンチレバーを音圧で共振させながら、入射角ごとの光応答性を計測した。

第 5 章では分光素子を音圧で共振させることによって、入射角ごとの光電流を得て、その信号から入射スペクトルを求めた。自動回転ステージによって入射角を走査しながら、1230 [nm] から 1330 [nm] までの単波長光を照射した。その結果、各入射角における光応答性に互いに異なるピーク波長があることが確認された。次に回転ステージ上での分光を行い、分光素子上に形成されているプラズモニック光検出器によって分光が可能か検証を行った。音圧により入射角走査を行い、分光対象となる光を入射させ、そのスペクトルを求めた。本研究の分光法を用いることで分光素子から得られる光電流信号から、単色光スペクトルと複数の単色光を組み合わせたスペクトルが得られた。これらのスペクトルを市販分光器の計測結果と比較したところ同等のスペクトルが得られていることがわかった。本研究の分光素子の波長分解能を調べたところ、20 [nm] であることがわかった。

最後に第 6 章では分光素子のカンチレバーを静電力によって角度走査し、分光を行った。カンチレバーの直上に外部電極をマイクロ XZ ステージによって位置関係を調整し、電極に固着せず角度走査範囲が最大になるようにした。カンチレバーが振動する様子は側面から高速度顕

微鏡によって確認した。カンチレバーと電極との相対距離を保ったままシールドボックス内部に設置し近赤外光を照射した。カンチレバーを静電力によって駆動することで光検出器に電圧が印加され、その電圧を起因とした電流が発生した。差動増幅回路を利用してその電流を除去した。静電駆動に起因する電流を除去しながら計測した光電流信号は波長によって異なる入射角でピークを持った。また、ピークは系統的に変化したため、そのピークは SPR によるものだと判断できる。最終的に、分光素子から出力される光電流信号を用いて分光を行い、市販分光器のスペクトルと同等の結果を得た。

以上の結果から本研究で提案した分光素子は音圧/静電力を用いた駆動で 1240~1310nm の波長帯域において 20 [nm] の波長分解能で分光が可能ということがわかる。また、金回折格子型プラズモニック光検出器を利用した分光はオンチップ上で可能であり、静電駆動に起因する電流を除去して入射スペクトルが得られることがわかった。

7.2 今後の課題・展望

本論文の分光素子のサイズは約 4×2 [mm²] であったが、金回折格子の周期構造の下限を考慮すると、原理的には画素サイズである数十 [μ m] のオーダーまで小型化できると考えられる。したがって、金回折格子型を利用した分光器は Fig.1.9 のように構成可能で、原理的には通常の撮像素子に組み込む応用が見込まれる。

本論文では金回折格子型プラズモニック光検出器を利用した分光がオンチップ上で可能か検証を行ったが、金回折格子型を撮像素子に組み込んだ場合の影響については取り扱っていなかった。撮像素子に組み込む場合に発生しうる問題として以下のものが挙げられる。

問題点

1. 画素サイズにすることで、受光面が小さくなり十分な S/N 比が得られない
2. 分光素子の角度走査機構が駆動することで撮像素子に無視できない振動が発生する
3. 撮像素子周辺の気温の変化により、素子の特性が変化する

まず問題点 1 についてであるが、金回折格子が接合する面について InGaAs などの化合物半導体を用いるという方法が挙げられる。本研究の分光素子の受光面は現在 2 [mm] 四方であるが、例えばこれが 20 [μ m] 四方になった場合を考えると、面積は 10^{-4} 倍になる。したがって素子表面に入射する光強度も 10^{-4} 倍になる。本研究の分光素子の光応答性は 10^{-4} [A/W] オーダーである。しかし、化合物半導体の光応答性は 1 [A/W] オーダーであり、化合物半導体を用いることで面積縮小の影響を相殺できる。また反射スペクトルを計測する場合、単純な解決

策として照射する光の強度を上げる方法が挙げられる。次に問題点2についてであるが、搭載する機器に十分質量があれば撮像素子に振動は発生しないと考えられる。また、振動によりRGB像に影響が出る場合でもその影響は周期的であるはずであり、信号処理により対応可能である。問題点3については分光素子の周辺に温度センサを配置し、その計測結果(温度)を用いて光電流信号を補正すれば対応できる。ショットキー光検出器が出力する電流値はその支配方程式[58]に従うため、温度が変化した場合の応答性行列も計算できると考えられる。

今後の課題としてこの分光器は現時点でTM偏光のみ分光するようになっており、TE偏光の光の入射に対応できていないことが挙げられる。この課題については、埋め込む分光器の数を4つに増やし、それぞれ0, 90, 45, -45 [deg]と溝の方位角を変えて配置することで対応できる。このように特定の偏波を計測する光検出器を4つ配置することで、入射光の偏波状態を表現するストークスパラメータを求められることが知られており、この構成により分光及び偏波情報を得られる可能性がある。また本研究のカンチレバーにはひずみゲージ等のカンチレバーの角度を計測するセンサがついていないため、将来的に実装を検討している。フッ酸蒸気エッチングの際にAlの配線がアタックされてオーミック接合が破壊されてしまう問題も発生しており、これについてはAl膜上にCytop®などを保護膜として形成する等の対策が考えられる*9。

今後の展望として、金回折格子型プラズモニック光検出器を利用した分光器を画素サイズに小型化する展開が考えられる。また、この分光素子の構造はその他の分光方式と比較して簡潔であり、今後はスマートデバイスや、ラボオンチップなどに応用できる可能性がある。

*9 <https://www.agc-chemicals.com/jp/en/fluorine/products/detail/index.html?pCode=JP-EN-F019>

謝辞

本博士論文の執筆及び私の博士課程における研究で、お世話になった方々にこの場を借りてお礼申し上げます。まず、本研究を進めるにあたり不可欠な助言と適切な指導をしてくださった、菅哲朗准教授に深く感謝します。博士前期課程から研究室に入ってきた私を MEMS プロセスの技術から論文執筆に至るまで丁寧に指導をしてくださったことは私にとって一生の財産となりました。また、私の遅筆なペーパーワークを暖かく見守ってくださったことは、五年間の研究の心の支えになりました。重ねてお礼申し上げます。青山尚之教授には学部生の頃より研究の基礎的な部分やプレゼンテーションについて適切な指導と助言をいただきました。心より感謝いたします。博士学位審査にあたって、副審査員を務めて頂いた Sandhu Adarsh 教授、内田雅文教授、金森哉史教授に深く感謝します。予備審査においてのご指摘とご助言は博士学位論文へのよい糧となりました。本研究の機構の設計 (主にカンチレバー)・製作と私のペーパーワークに多大な助言やサポートをくださった高橋英俊講師に深く感謝致します。本研究のプラズモニック構造とショットキー接合を形成する手法を構築するにあたり、数多くの助言や有益な考察をくださった安食嘉晴博士に感謝の意を表します。また、VDEC で半導体加工装置や電子ビーム蒸着装置などを使用するたびにお付き合いいただいた塚越拓哉博士には大変お世話になりました。本研究の計測に使用しているアンプのノイズ低減等、様々な助言をくださったオリンパスの田宮公成さんに深く感謝します。本研究を遂行する上で欠かすことのできないフォトマスクの製造には EB マスク描画装置 (F5112 + VD01) が使用されており、このプロセスについてはアドバンテスト社の寄付と東京大学システムデザインラボ (d.lab) の職員の皆様のメンテナンスになしには成り立ちませんでした。また本研究の大部分の半導体プロセスは微細加工は、電気通信大学の先端研究施設 (DARF) のクリーンルームで行われました。クリーンルームの維持管理に尽力してくださった管理者の皆様へ深く感謝申し上げます。本研究はイムラ・ジャパン株式会社との共同研究の成果であり、職員の白石様・斎藤様には数々のご助言とサポートを頂きました。また研究を遂行する上で必要な助成金を支出してくださった立石科学財団と The Transducer Research Foundation に感謝申し上げます。また、本研究は JSPS 科

研費（JP21J13187）の助成を受けたものです。感謝申し上げます。私が研究室に入って間もない頃、半導体プロセス技術の基本や研究室での生活の仕方を教えてくれた同輩の石原拓哉君に感謝します。事務職員の太田様には私の書類作業についてサポートいただき、大変な苦勞をおかけしました。この場をお借りして、深く感謝申し上げます。私が学部生のころから住まわせてもらっている狛江学生下宿の入居者の皆様・大家の宮木様につきましても研究生活の相談や助言等をいただきました。近所のラーメン屋（九六・蓮爾）に毎週行って雑談をしたり、下宿の庭でBBQをしたことは、研究活動のよい息抜きになりました。深く感謝申し上げます。菅研究室の皆様には研究会での意見交換や輪講での活発な議論だけでなく、実験から日常生活においても大変お世話になりました。特にファブリケーションプロセスや実験がうまく行かないときなどに有益な助言や指摘をくれた研究員の白石博士や同輩の安永君、後輩の古澤君には感謝してもしきれません。この博士論文も皆さんの温かいご助力なしにはありませんでした。重ねてお礼申し上げます。最後にこれまで私を育て、支えてくれた家族なしに今の私はありません。心より感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Manley, “Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: Non-destructive analysis of biological materials,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 24, pp. 8200–8214, 2014.
- [2] M. J. Khan, H. S. Khan, A. Yousaf, K. Khurshid, and A. Abbas, “Modern Trends in Hyperspectral Image Analysis: A Review,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 14 118–14 129, 2018.
- [3] A.-K. Mahlein, U. Steiner, C. Hillnhütter, H.-W. Dehne, and E.-C. Oerke, “Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases,” *Plant Methods*, vol. 8, no. 1, p. 3, Jan. 2012.
- [4] F. Manni, F. van der Sommen, H. Fabelo, S. Zinger, C. Shan, E. Edström, A. Elmi-Terander, S. Ortega, G. Marrero Callicó, and P. H. N. de With, “Hyperspectral Imaging for Glioblastoma Surgery: Improving Tumor Identification Using a Deep Spectral-Spatial Approach,” *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6955, Jan. 2020.
- [5] N. Hagen and M. W. Kudenov, “Review of snapshot spectral imaging technologies,” *Optical Engineering*, vol. 52, no. 9, p. 090901, Sept. 2013.
- [6] N. Li, C. P. Ho, I.-T. Wang, P. Pitchappa, Y. H. Fu, Y. Zhu, and L. Y. T. Lee, “Spectral imaging and spectral LIDAR systems: Moving toward compact nanophotonics-based sensing,” *Nanophotonics*, vol. 10, no. 5, pp. 1437–1467, Mar. 2021.
- [7] W. E. Ortyn and D. A. Basiji, “Imaging and analyzing parameters of small moving objects such as cells,” U.S. Patent 6 211 955 B1, 2003.
- [8] S.-W. Wang, C. Xia, X. Chen, W. Lu, M. Li, H. Wang, W. Zheng, and T. Zhang, “Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array,” *Optics Letters*, vol. 32, no. 6, p. 632, Mar. 2007.
- [9] Z. Wang, *et al.*, “Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs,” *Nature Communications*, vol. 10, no. 1, p. 1020, Dec. 2019.
- [10] K. Monakhova, K. Yanny, N. Aggarwal, and L. Waller, “Spectral DiffuserCam: Lensless

- snapshot hyperspectral imaging with a spectral filter array,” *Optica*, vol. 7, no. 10, p. 1298, Oct. 2020.
- [11] S. Kong, D. Wijngaards, and R. Wolffenbuttel, “Infrared micro-spectrometer based on a diffraction grating,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 92, no. 1-3, pp. 88–95, Aug. 2001. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424701005441>
- [12] R. Wolffenbuttel, “State-of-the-Art in Integrated Optical Microspectrometers,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 1, pp. 197–202, Feb. 2004.
- [13] S. Grabarnik, A. Emadi, H. Wu, G. de Graaf, and R. Wolffenbuttel, “Microspectrometer with a concave grating fabricated in a MEMS technology,” *Procedia Chemistry*, vol. 1, no. 1, pp. 401–404, Sept. 2009. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876619609001016>
- [14] Z. Yang, T. Albrow-Owen, W. Cai, and T. Hasan, “Miniaturization of optical spectrometers,” *Science*, vol. 371, no. 6528, p. eabe0722, Jan. 2021.
- [15] A. Rissanen, A. Akujärvi, J. Antila, M. Blomberg, and H. Saari, “MOEMS miniature spectrometers using tuneable Fabry-Perot interferometers,” *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, vol. 11, no. 2, pp. 023 003–1, May 2012. [Online]. Available: <http://nanolithography.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.JMM.11.2.023003>
- [16] T. Enomoto, M. Suzuki, T. Iwaki, H. Wado, and Y. Takeuchi, “Infrared absorption sensor for multiple gas sensing. Development of a Fabry-Perot spectrometer with ultrawide wavelength range,” *Electronics and Communications in Japan*, vol. 96, no. 5, pp. 50–57, May 2013. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/ecj.10433>
- [17] A. Emadi, H. Wu, G. de Graaf, and R. Wolffenbuttel, “Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a Linear-Variable Optical Filter,” *Optics Express*, vol. 20, no. 1, p. 489, Jan. 2012. [Online]. Available: <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-20-1-489>
- [18] P. Levin, E. Ashkenazy, A. Raz, M. Hershcovitz, S. Bouwstra, D. Mendlovic, and S. Krylov, “A Wafer Level Packaged Fully Integrated Tunable Fabry-Pérot Filter With Extended Optical Range For Multispectral and Hyperspectral Imaging,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 357–369, June 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9043723/>
- [19] O. Manzardo, H. P. Herzig, C. R. Marxer, and N. F. de Rooij, “Miniaturized time-scanning

-
- Fourier transform spectrometer based on silicon technology,” *Optics Letters*, vol. 24, no. 23, pp. 1705–1707, 1999.
- [20] D. M. Kita, B. Miranda, D. Favela, D. Bono, J. Michon, H. Lin, T. Gu, and J. Hu, “High-performance and scalable on-chip digital Fourier transform spectroscopy,” *Nature Communications*, vol. 9, no. 1, p. 4405, Dec. 2018. [Online]. Available: <http://www.nature.com/articles/s41467-018-06773-2>
- [21] Y. M. Eltagoury, Y. M. Sabry, and D. A. Khalil, “All-Silicon Double-Cavity Fourier-Transform Infrared Spectrometer On-Chip,” *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 10, p. 1900441, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/admt.201900441>
- [22] D. Pohl, *et al.*, “An integrated broadband spectrometer on thin-film lithium niobate,” *Nature Photonics*, vol. 14, no. 1, pp. 24–29, Jan. 2020.
- [23] B. Redding, S. F. Liew, R. Sarma, and H. Cao, “Compact spectrometer based on a disordered photonic chip,” *Nature Photonics*, vol. 7, no. 9, pp. 746–751, Sept. 2013. [Online]. Available: <http://www.nature.com/articles/nphoton.2013.190>
- [24] P. Wang and R. Menon, “Computational spectrometer based on a broadband diffractive optic,” *Optics Express*, vol. 22, no. 12, p. 14575, June 2014. [Online]. Available: <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-22-12-14575>
- [25] Z. Yang, *et al.*, “Single-nanowire spectrometers,” *Science*, vol. 365, no. 6457, pp. 1017–1020, Sept. 2019.
- [26] W. Hartmann, P. Varytis, H. Gehring, N. Walter, F. Beutel, K. Busch, and W. Pernice, “Waveguide-Integrated Broadband Spectrometer Based on Tailored Disorder,” *Advanced Optical Materials*, vol. 8, no. 6, p. 1901602, Mar. 2020. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.201901602>
- [27] B. Zheng, L. Li, J. Wang, M. Zhuge, X. Su, Y. Xu, Q. Yang, Y. Shi, and X. Wang, “On-Chip Measurement of Photoluminescence with High Sensitivity Monolithic Spectrometer,” *Advanced Optical Materials*, vol. 8, no. 11, p. 2000191, June 2020.
- [28] A. Rissanen, B. Guo, H. Saari, A. Näsilä, R. Mannila, A. Akujärvi, and H. Ojanen, “VTT’s Fabry-Perot interferometer technologies for hyperspectral imaging and mobile sensing applications,” in *SPIE OPTO*, W. Piyawattanametha and Y.-H. Park, Eds., San Francisco, California, United States, Feb. 2017, p. 101160I.

- [29] J. P. Carmo, R. P. Rocha, M. Bartek, G. de Graaf, R. F. Wolffenbuttel, and J. H. Correia, “A review of visible-range Fabry–Perot microspectrometers in silicon for the industry,” *Optics & Laser Technology*, vol. 44, no. 7, pp. 2312–2320, Oct. 2012.
- [30] P. Levin, E. Ashkenazy, A. Raz, M. Hershcovitz, S. Bouwstra, D. Mendlovic, and S. Krylov, “A Wafer Level Packaged Fully Integrated Tunable Fabry-Pérot Filter With Extended Optical Range For Multispectral and Hyperspectral Imaging,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 357–369, June 2020.
- [31] L. Bei, “Acousto-optic tunable filters: Fundamentals and applications as applied to chemical analysis techniques,” *Progress in Quantum Electronics*, vol. 28, no. 2, pp. 67–87, 2004.
- [32] N. Gat, “Imaging spectroscopy using tunable filters: A review,” in *Wavelet Applications VII*, vol. 4056. SPIE, Apr. 2000, pp. 50–64.
- [33] L. P. Schuler, J. S. Milne, J. M. Dell, and L. Faraone, “MEMS-based microspectrometer technologies for NIR and MIR wavelengths,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 42, no. 13, p. 133001, July 2009.
- [34] M. L. Brongersma, “Plasmonic Photodetectors, Photovoltaics, and Hot-Electron Devices,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 12, pp. 2349–2361, Dec. 2016.
- [35] A. Dorodnyy, Y. Salamin, P. Ma, J. Vukajlovic Plestina, N. Lassaline, D. Mikulik, P. Romero-Gomez, A. Fontcuberta i Morral, and J. Leuthold, “Plasmonic Photodetectors,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1–13, Nov. 2018.
- [36] M. Jestl, A. Köck, W. Beinstingl, and E. Gornik, “Polarization- and wavelength-selective photodetectors,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 5, no. 9, p. 1581, Sept. 1988.
- [37] A. Sobhani, M. W. Knight, Y. Wang, B. Zheng, N. S. King, L. V. Brown, Z. Fang, P. Nordlander, and N. J. Halas, “Narrowband photodetection in the near-infrared with a plasmon-induced hot electron device,” *Nature Communications*, vol. 4, no. 1, p. 1643, June 2013.
- [38] H. Chalabi, D. Schoen, and M. L. Brongersma, “Hot-Electron Photodetection with a Plasmonic Nanostripe Antenna,” *Nano Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 1374–1380, Mar. 2014.
- [39] Y. Ajiki, T. Kan, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, “Electrically detectable surface plasmon resonance sensor by combining a gold grating and a silicon photodiode,” *Applied Physics Express*, vol. 11, no. 2, p. 022001, Feb. 2018.
- [40] W. Chen, T. Kan, Y. Ajiki, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, “NIR spectrometer using a

-
- Schottky photodetector enhanced by grating-based SPR,” *Optics Express*, vol. 24, no. 22, p. 25797, Oct. 2016.
- [41] R. Degl’Innocenti, S. J. Kindness, H. E. Beere, and D. A. Ritchie, “All-integrated terahertz modulators,” *Nanophotonics*, vol. 7, no. 1, pp. 127–144, Jan. 2018.
- [42] S. Bang, J. Kim, G. Yoon, T. Tanaka, and J. Rho, “Recent Advances in Tunable and Reconfigurable Metamaterials,” *Micromachines*, vol. 9, no. 11, p. 560, Oct. 2018.
- [43] L. Midolo, A. Schliesser, and A. Fiore, “Nano-opto-electro-mechanical systems,” *Nature Nanotechnology*, vol. 13, no. 1, pp. 11–18, Jan. 2018.
- [44] K. Xiong, D. Tordera, M. P. Jonsson, and A. B. Dahlin, “Active control of plasmonic colors: Emerging display technologies,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 82, no. 2, p. 024501, Feb. 2019.
- [45] H. Tao, A. C. Strikwerda, K. Fan, W. J. Padilla, X. Zhang, and R. D. Averitt, “Reconfigurable Terahertz Metamaterials,” *Physical Review Letters*, vol. 103, no. 14, p. 147401, Oct. 2009.
- [46] A. L. Holsteen, A. F. Cihan, and M. L. Brongersma, “Temporal color mixing and dynamic beam shaping with silicon metasurfaces,” *Science*, vol. 365, no. 6450, pp. 257–260, July 2019.
- [47] M. Lapine, I. V. Shadrivov, D. A. Powell, and Y. S. Kivshar, “Magnetoelastic metamaterials,” *Nature Materials*, vol. 11, no. 1, pp. 30–33, Jan. 2012.
- [48] R. Thijssen, E. Verhagen, T. J. Kippenberg, and A. Polman, “Plasmon Nanomechanical Coupling for Nanoscale Transduction,” *Nano Letters*, vol. 13, no. 7, pp. 3293–3297, July 2013.
- [49] J.-Y. Ou, E. Plum, J. Zhang, and N. I. Zheludev, “An electromechanically reconfigurable plasmonic metamaterial operating in the near-infrared,” *Nature Nanotechnology*, vol. 8, no. 4, pp. 252–255, Apr. 2013.
- [50] 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, Apr. 2015.
- [51] H.-S. Ee and R. Agarwal, “Tunable Metasurface and Flat Optical Zoom Lens on a Stretchable Substrate,” *Nano Letters*, vol. 16, no. 4, pp. 2818–2823, Apr. 2016.
- [52] H. Honma, M. Mitsudome, M. Ishida, K. Sawada, and K. Takahashi, “Nano-optomechanical characterization of surface-plasmon-based tunable filter integrated with comb-drive actuator,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 27, no. 3, p. 034001, Mar. 2017.

- [53] W. Chen, *et al.*, “Ultrasensitive, Mechanically Responsive Optical Metasurfaces *via* Strain Amplification,” *ACS Nano*, vol. 12, no. 11, pp. 10 683–10 692, Nov. 2018.
- [54] T. Roy, S. Zhang, I. W. Jung, M. Troccoli, F. Capasso, and D. Lopez, “Dynamic metasurface lens based on MEMS technology,” *APL Photonics*, vol. 3, no. 2, p. 021302, Feb. 2018.
- [55] Y. Yao, R. Shankar, M. A. Kats, Y. Song, J. Kong, M. Loncar, and F. Capasso, “Electrically Tunable Metasurface Perfect Absorbers for Ultrathin Mid-Infrared Optical Modulators,” *Nano Letters*, vol. 14, no. 11, pp. 6526–6532, Nov. 2014.
- [56] Z. Dong, C. Sun, J. Si, and X. Deng, “A tunable plasmonic nano-antenna based on metal–graphene double-nanorods,” *Laser Physics Letters*, vol. 15, no. 5, p. 056202, May 2018.
- [57] 大野 進一 and 山崎 徹, *機械音響工学*. コロナ社, Apr. 2004.
- [58] P. S. J. Berini and C. A. Scales, “SCHOTTKY BARRIER PHOTODETECTORS,” U.S. Patent US 7,026,701, Apr., 2006.
- [59] 岡本 隆弘 and 梶川 浩太郎, *プラズモニクス-基礎と応用*. 講談社, Oct. 2010.
- [60] A. D. Rakić, A. B. Djurišić, J. M. Elazar, and M. L. Majewski, “Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices,” *Applied Optics*, vol. 37, no. 22, p. 5271, Aug. 1998.
- [61] W. Chen, “NIR Spectrometer by a Schottky Photodetector with an Au Grating (金回折格子を有するショットキー型光検出器による 近赤外分光器),” Ph.D. dissertation, University of Tokyo, 2016.
- [62] A. Isozaki, T. Kan, H. Takahashi, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, “Out-of-plane actuation with a sub-micron initial gap for reconfigurable terahertz micro-electro-mechanical systems metamaterials,” *Optics Express*, vol. 23, no. 20, p. 26243, Oct. 2015.
- [63] S. K. Cheung and N. W. Cheung, “Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics,” *Applied Physics Letters*, vol. 49, no. 2, pp. 85–87, July 1986.
- [64] D. Hah, H. Toshiyoshi, and M. C. Wu, “Design of electrostatic actuators for MOEMS applications,” in *Symposium on Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS 2002*, B. Courtois, J. M. Karam, K. W. Markus, B. Michel, T. Mukherjee, and J. A. Walker, Eds., Cannes-Mandelieu, France, Apr. 2002, pp. 200–207.
- [65] D. Hah, P. Patterson, H. Nguyen, H. Toshiyoshi, and M. Wu, “Theory and Experiments of Angular Vertical Comb-Drive Actuators for Scanning Micromirrors,” *IEEE Journal of Selected*

Topics in Quantum Electronics, vol. 10, no. 3, pp. 505–513, May 2004.

- [66] P. Patterson, Dooyoung Hah, Hung Nguyen, H. Toshiyoshi, Ru-min Chao, and M. Wu, “A scanning micromirror with angular comb drive actuation,” in *Technical Digest. MEMS 2002 IEEE International Conference. Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No.02CH37266)*. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2002, pp. 544–547.

論文目録

論文

1. 題目「角度走査型プラズモニク光検出器による近赤外分光素子の研究」
2. 冊数 1
3. 関連論文の印刷公表の方法及び時期
 - (1) **Masaaki Oshita***, Hidetoshi Takahashi, Tetsuo Kan
論文題目「Miniaturization of a grating based SPR type near infrared spectrometer by using vibration of a MEMS cantilever」
2018年01月 Proceedings of International Conference on IEEE MEMS 2018
(博士前期課程時出版・第3章に関連)
 - (2) **Masaaki Oshita***, Hidetoshi Takahashi, Yoshiharu Ajiki, Tetsuo Kan
論文題目「Reconfigurable Surface Plasmon Resonance Photodetector with a MEMS Deformable Cantilever」
2020年02月 ACS Photonics, vol. 7, no. 3, pp. 673-679
(博士後期課程時投稿・出版・第4章に関連)
 - (3) **Masaaki Oshita***, Yousuke Yamamoto, Shiro Saito, Tetsuo Kan
論文題目「Reconstructive spectrometer based on plasmonic schottky photodetector with MEMS angular modulator」
2021年08月 Proceedings of Transducers 2021
(博士後期課程時投稿・出版・第5章に関連)
 - (4) **Masaaki Oshita***, Shiro Saito, Tetsuo Kan
論文題目「Reconfigurable plasmonic photodetector integrated with electrostatic actuator for spectrometry」
2022年01月 Proceedings of International Conference on IEEE MEMS 2022
(博士後期課程時投稿・出版・第6章に関連・2021年10月に採録決定済み)

参考論文

1. 題目「Gas Detection by Near-Infrared Spectroscopy Based on a Surface Plasmon Resonance Photodetector」
2. 印刷公表の方法及び時期
2020年01月 Proceedings of International Conference on IEEE MEMS 2020
1. 題目「研究紹介：光を操るシリコンプラズモンアンテナMEMS技術」
2. 印刷公表の方法及び時期
2020年11月応用物理（第89巻 第11号）
1. 題目「Near-Infrared Spectroscopic Gas Detection Using Surface Plasmon Resonance Photodetector with 20-nm Resolution」
2. 印刷公表の方法及び時期
2021年11月 ACS Applied Nano Materials