

# 修士論文

熱駆動型可変ファブリ・ペロー干渉計MEMSミラーと  
その小型原子時計応用に関する研究

Study on thermally actuated MEMS mirror  
for tunable Fabry-Pérot interferometer  
and its application to chip-scale atomic clock

指導教員 年吉 洋 教授  
東京大学生産技術研究所

東京大学大学院 工学系研究科  
電気系工学専攻 電気電子コース 修士課程  
37-236517 羽山 由梨

2025 年 2 月 18 日提出

# 要旨

高精度な時刻同期には小型原子時計（Chip Scale Atomic Clock, CSAC）が重要であり，さらなる小型化には安定した波長可変レーザ光源が必要である．小型原子時計のガスセルを励起する光源の波長ドリフトを抑制するために，MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて熱駆動型の小型ファブリ・ペロー干渉計を構成した．従来の静電駆動型と比べて環境振動に対するノイズを数分の 1 に低減可能であり，小型原子時計の高精度化が可能であることを示した．

# 目次

要旨 .....	1
第 1 章 序論 .....	1
1.1 原子時計 .....	1
1.2 原子時計の小型化.....	2
1.3 MEMS.....	5
1.4 MEMS-VCSEL の先行研究.....	6
1.5 先行研究の問題と特定の課題.....	8
1.6 レーザの波長ゆらぎの原因.....	10
1.7 本研究の解決方策.....	11
1.8 本研究の意義.....	12
1.8.1 超高速取引.....	12
1.8.2 ITS (Intelligent transport systems).....	13
1.9 本研究の目的.....	13
第 2 章 熱アクチュエータの理論.....	15
2.1 MEMS-VCSEL の波長可変の原理.....	15
2.2 静電駆動型と比べた利点.....	18
2.2.1 動作周波数範囲の違い.....	18
2.2.2 駆動力の違い.....	18
2.3 熱アクチュエータの数値シミュレーション .....	20
2.4 第 2 章の結論.....	21
第 3 章 SiO <sub>2</sub> 膜を用いた熱アクチュエータの製作.....	22
3.1 MEMS デザインと製作プロセス .....	22
3.2 測定・評価 .....	33
3.2.1 LDV .....	33
3.2.1.1 変位測定.....	34

3.2.1.2	周波数応答.....	35
3.2.2	有効抵抗温度係数計測.....	35
3.3	考察 .....	37
3.4	第 3 章の結論.....	38
第 4 章	SOI ウエハを用いた熱アクチュエータの製作 .....	39
4.1	MEMS デザインと製作プロセス.....	39
4.2	SOI 熱アクチュエータの試作結果 .....	44
4.3	LDV を用いた測定・評価 .....	48
4.3.1	変位測定.....	48
4.3.2	周波数応答.....	49
4.4	考察 .....	49
4.5	第 4 章の結論.....	50
第 5 章	結論 .....	51
5.1	各章のまとめ.....	51
5.2	本研究の結論.....	52
5.3	今後の検討課題.....	52
本研究に関する発表文献.....		53
参考文献 .....		54
謝辞 .....		58

# 第1章

## 序論

### 1.1 原子時計

時間と周波数の基準が正確に決まれば，通信ネットワークや全地球測位システム（Global Positioning System, GPS）[1] など，さまざまな電子システムの高性能化につながる[2, 3]. 1955 年にイギリス国立物理学研究所（National Physical Laboratory, NPL）がセシウム（Cs）原子を用いて，時刻精度  $10^{-10}$  s 程度の原子時計を製作し[4]，図 1.1 に示すように現在の 1 秒の定義は， $^{133}\text{Cs}$  の原子の基底状態の 2 つの超微細構造準位間の遷移に対応する放射の周期の 9,192,631,770 倍の継続時間と国際単位系（Le Systeme International d'Unites, SI）で定められた．図 1.2 に示すような原子時計の持つ高い時刻精度と周波数安定性は，ネットワーク同期や基礎物理学においても中心的な役割を果たしている[5].

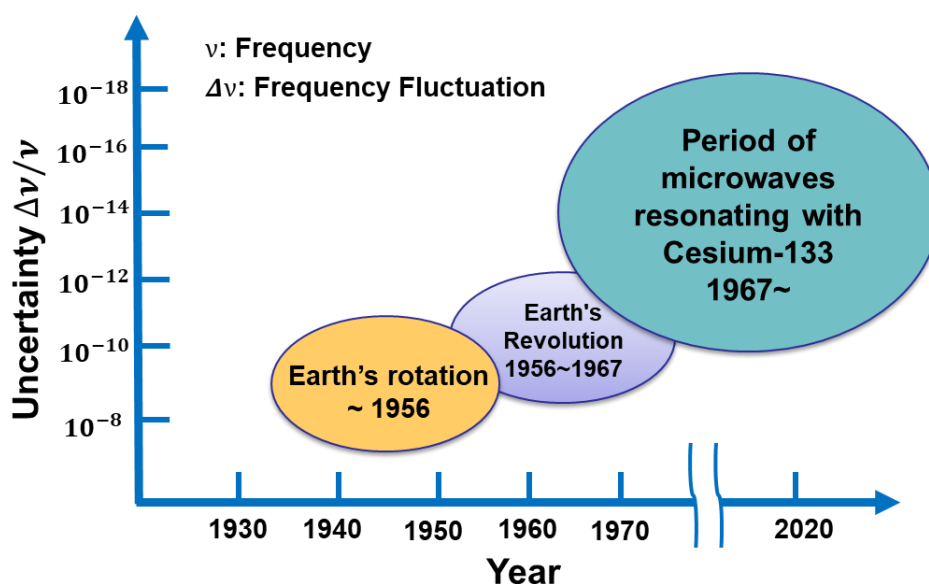


図 1.1: 秒の定義の変遷，図は[6]を参考に著者が作成



図 1.2: ラックサイズの高精度原子時計[7]

## 1.2 原子時計の小型化

小型原子時計（Chip-Scale Atomic Clock, CSAC）は、非常に安定しており、低消費電力でコンパクトな周波数基準源であるという利点がある[8]。ポータブルデバイスに搭載することで、全地球航法衛星システム（Global Navigation Satellite System, GNSS）に頼らずに時刻同期可能であり、同期に必要な時間を短縮できるだけでなく、干渉に対する耐性を大幅に向上できる[2]。

アメリカにおいては、2001 年 9 月 11 日の同時多発テロを受け、通信分野を含む重要インフラ防護対策を総括する役割を担う国土安全保障省（United States Department of Homeland Security, DHS）が 2003 年 1 月 24 日から正式に業務を開始している[9]。2013 年 8 月時点の研究開発情報として、超高精度原子時計を開発という題目で、アメリカ国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology, NIST）は、国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）の「クエーサー（Quantum-Assisted Sensing and Readout, QuASAR）」プログラムからの助成により、従来よりも 10 倍の精度を持つ新型原子時計を開発したことを発表し、将来的にこの原子時計を既存の GPS 衛星に応用すれば 1 万倍の精度を実現可能だとわかっている。（"DARPA,-funded atomic clock sets record for stability"）[10]。

図 1.3 に示すように, 2011 年に米国 Symmetricom 社から民生用として, 消費電力 120 mW, 体積 17 cm<sup>3</sup>, 重量 35 g, 平均化時間 1 秒でのアラン標準偏差 (短期周波数安定度) [11] が  $3.0 \times 10^{-10}$  の CSAC が市販されている[12].



図 1.3: Symmetricom 社製市販 CSAC [12]

また先行研究では, 2019 年に消費電力 60 mW, 体積 15 cm<sup>3</sup>, 平均化時間 1 秒でのアラン標準偏差が  $6.71 \times 10^{-11}$ , 平均化時間  $10^5$  s でのアラン標準偏差が  $2.2 \times 10^{-12}$  の小型超低電力原子時計 (Ultralow-Power Atomic Clock, ULPAC) が開発されている[3].

ここでアラン標準偏差とは, 周波数の標準偏差を周波数の絶対値で割った値, すなわち相対的な周波数変動の度合いを表している[13].  $\frac{s}{N}$  を信号対雑音比,  $Q$  はスペクトル信号の  $Q$  値,  $\tau$  を平均化時間として, 短期周波数安定度  $\sigma_y(\tau)$  は,

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{Q \cdot \frac{s}{N}} \tau^{-\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

と表され,  $\tau$  ごとに測定した周波数のゆらぎの値が小さいほど安定度は高くなる[14].  $Q$  値はスペクトル線幅に反比例するため, 小型原子時計の周波数安定度を良くするには, スペクトル線幅を狭くし, 信号強度を大きくすればよい[15].

原子時計は, 主に Cs 原子やルビジウム (Rb) 原子などのアルカリ金属ガスを, アルゴン (Ar), ネオン (Ne), 窒素 (N<sub>2</sub>) などの不活性な元素や分子 (バッファガス) と共に封入したガスセルが利用されている[14].

小型原子時計の周波数基準には, アルカリ元素ガスの CPT (Coherent Population Trapping) 共鳴によるエネルギー遷移が用いられる[16]. 図 1.4 に示すように, CPT 共鳴はひとつの励起準位と二つの基底準位からなり, 基底準位間には禁制関係にある 3 準位系が関係する[17]. たとえば <sup>87</sup>Rb 原子に光を照射すると, 通常であれば原子が光を吸収し, 透過光量は減少する. 一方で 5S<sub>1/2</sub> の二つの基底準位から <sup>87</sup>Rb 原子にそれぞれ周波数  $\nu_1$  と  $\nu_2$  の 2 種類の光を照射し, 光の周波数差が <sup>87</sup>Rb 原子の固有周波数と一致すると, 原子と光が相互作用しない暗共鳴と呼ばれる量子力学的な重ね合わせ状態が発生し, 周波数  $\nu_1$  と  $\nu_2$  の光がともに原子に吸

収されなくなる．そのため透過光強度が急激に増加して鋭いスペクトルが観測される[18]．この吸収スペクトルに外部のマイクロ波発振器の発振周波数をフィードバック制御でロックすることで超高安定な周波数標準が得られる[17]．CPT 方式はマイクロ波共振器を必要としないため，原子時計の小型化に有効な手法である[8]．

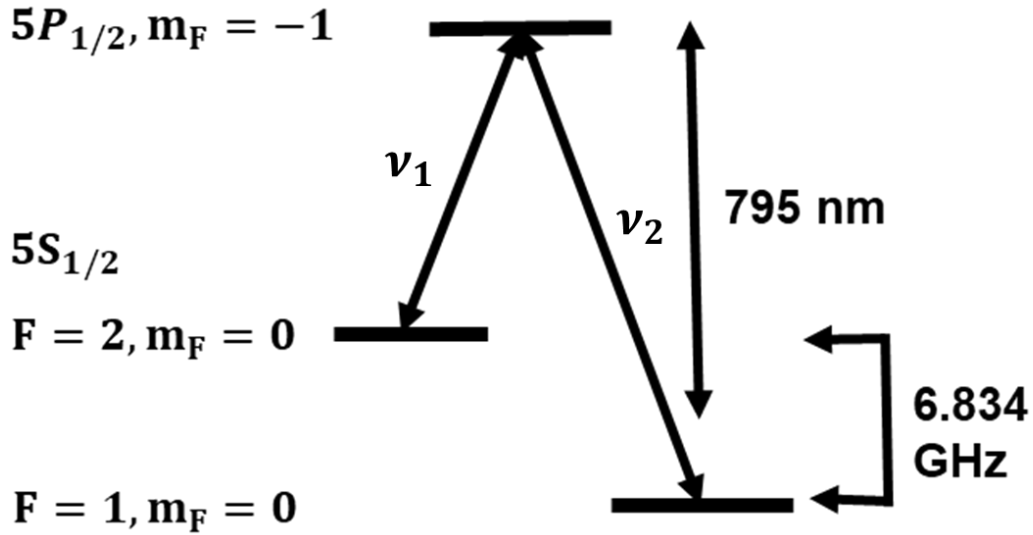


図 1.4: CPT を示す  $^{87}\text{Rb}$  のエネルギー準位，図は[2, 8]を参考に著者が作成

ガスセルのサイズが大きいほど信号に寄与する原子の数が多くなるので SN 比が良くなる．また同じ速度であればセルのサイズが大きければ壁に衝突するまでの時間が長くなるので，原子と光の相互作用時間が長くなって線幅が狭くなり，式(1.1)より周波数安定度が向上する[13]．原子時計には時刻の正確性と周波数の安定性が重要であり，ガスセルのサイズは原子時計の精度を決める主なパラメタであるため，小型化と高精度化の両立における技術課題の 1 つがガスセルのサイズである．

図 1.5 に示すように，CPT の発生源としてマイクロ波変調した半導体レーザを使用するため，レーザ光源の性能が重要である． $^{87}\text{Rb}$  の遷移に合わせて調整された波長 795nm のレーザは，ビーム調整光学系と，制御された圧力のバッファガスを含む蒸気セルを通過する．透過光は，光検出器によって CPT 共鳴が検出され，電子制御ループを使用し，変調周波数を共鳴信号にロックし，レーザ波長を安定させる[19]．一般的な VCSEL チューニング係数を  $0.06 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  と仮定したとき，熱電冷却器 (thermo electrical cooler, TEC) を用いて VCSEL の温度を  $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  の範囲で変化させる場合，VCSEL の波長チューニング範囲は  $\pm 0.3 \text{ nm}$  である[20, 21]．1 日以内の時間間隔で  $10^{-11}$  の範囲の周波数安定性をもち，パッケージが  $1 \text{ cm}^3$  を超えないレーザ光源は，携帯用電子機器で広く使用される可能性があることをふまえて[2, 8]，本分野の研究者は原子時計の小型化と高精度化の同時実現を目指している．



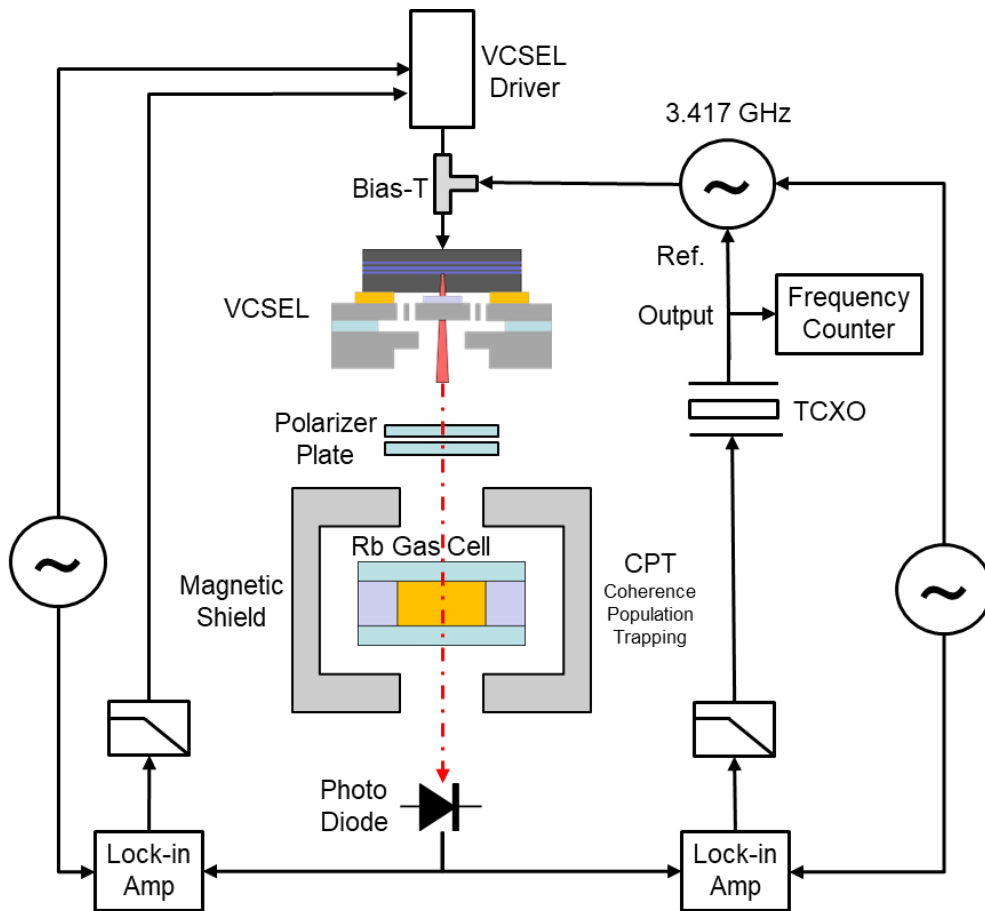


図 1.5:  $^{87}\text{Rb}$  ベースの CSAC 用レーザ光源としての MEMS-VCSEL まわりのブロック図  
図は[22, 23]を参考に著者が作成

### 1.3 MEMS

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) とは、おもに半導体微細加工技術を用いて微小な可動機械構造を製作する技術の総称である。計測、通信、入出力デバイスの一般的な技術トレンドは、性能と信頼性の向上のために小型化の方向に向かっており[24]、MEMS 技術の重要性はさらに高まっている。原子時計のサイズと動作電力を削減するため、通常 MEMS に適用される製造技術が使用される[2]。

本研究では 1977 年に伊賀[25, 26]によって発明された垂直共振器面発光レーザ (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) に着目した。VCSEL はキャビティ容積が小さいため、しきい値が非常に低く、動的シングルモード動作で、広く連続した波長チューニングできる利点がある[27]。また MEMS 技術による垂直スタック統合が可能のため、MEMS-VCSEL を利用することで小型かつ高性能な原子時計が実現できると考えられる。

## 1.4 MEMS-VCSEL の先行研究

MEMS-VCSEL をレーザ光源として応用した他の例として、光干渉断層計 (Optical Coherence Tomography, OCT) を挙げる。OCT とは、光の干渉現象を利用して対象物の断層画像を非侵襲・非破壊・非接触で観察する技術であり、すでに実用化が進んでいる眼底 (網膜) 検査方法の 1 つである。OCT の測定原理は、1987 年に高田ら[28]によって、SLD (Super Luminescent Diode) 光源を用いた干渉計で、10  $\mu\text{m}$  オーダーで光導波路の故障検出が実証されたことから始まる。1990 年には丹野ら[29]によって光波反射像測定装置の国内特許が出願され、1991 年にマサチューセッツ工科大学 (MIT) の Huang ら[30]が断層画像化に成功した。その後 1996 年には Humphrey 社[31]から、商用モデルの眼底検査装置が世界で初めて市販された。MEMS-VCSEL に関連する主な先行研究としては、2000 年の初期の波長可変カンチレバー VCSEL [32]や、2012 年からの初期の眼科 OCT 用 MEMS-VCSEL が挙げられる。また MEMS-VCSEL の中でも、波長 1310 nm を中心として 110 nm の調整可能な帯域幅をもつものや、中心波長 1050 nm で 58.8 nm の可変波長幅のレーザ光源の実証報告例がある[33, 34]。また図 1.6 に示すように、インジウムガリウムヒ素 (InGaAs) のレーザダイオードチップを、ファブリー・ペロー干渉計 (Fabry-Pérot interferometer, FPI) として機能する静電駆動型の MEMS ミラーを備えた SOI (Silicon on Insulator) チップ上にダイボンディングして構築した VCSEL の報告がある。印加電圧の静電駆動力でレーザのキャビティ長を機械的に制御する波長可変光源を実現する MEMS-VCSEL を用いると、シングルモードで共振器長が短いため、図 1.7 に示したようにコヒーレンス長は 150 m 以上に増大される。また、走査深度が深いので、図 1.8 に示すように眼球全体に相当する大きさの物体を一度の撮影で OCT 観察できる[35]。OCT 用光源は実用化を前提とした安定供給や入手性の高さが求められ、OCT 応用と同様にして MEMS-VCSEL を CSAC にも適用できる。

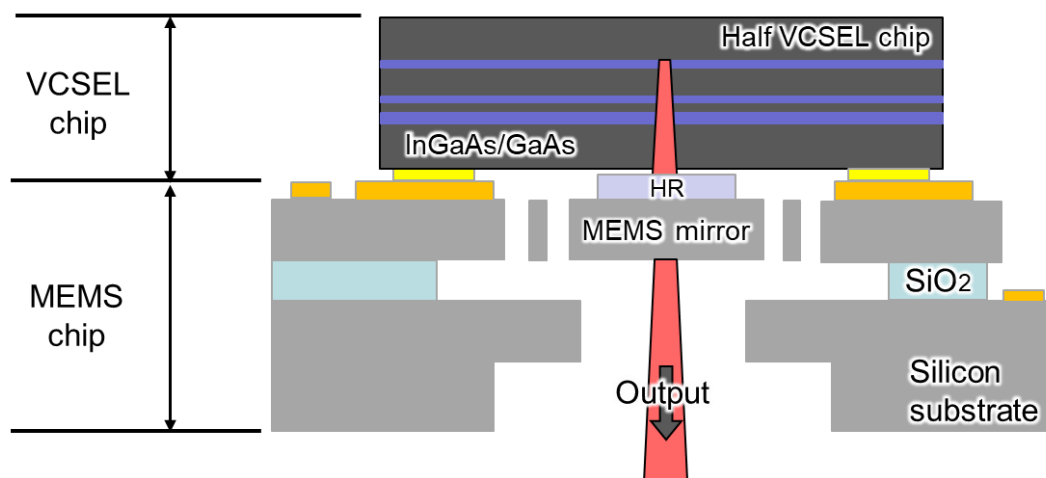


図 1.6: MEMS-VCSEL, シリコン (Si) MEMS 上の InGaAs チップの概略図

図は[35, 36]を参考に著者が作成

ここで光源の帯域幅を $\Delta\lambda_{BW}$ とすると、コヒーレンス長 $l_c$ と波長 $\lambda$ との関係は、

$$l_c = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda_{BW}} \quad (1.2)$$

と表され、帯域幅 $\Delta\lambda_{BW}$ が広いほどコヒーレンス長 $l_c$ は短くなることがわかる。図 1.7 に示すように、光がシングルモードのとき、正弦波が繰り返され、光のコヒーレンス性は高い。一方、マルチモードのとき、各モードの光が重なるとビートが生まれ、光のコヒーレンス性は低くなる[35]。

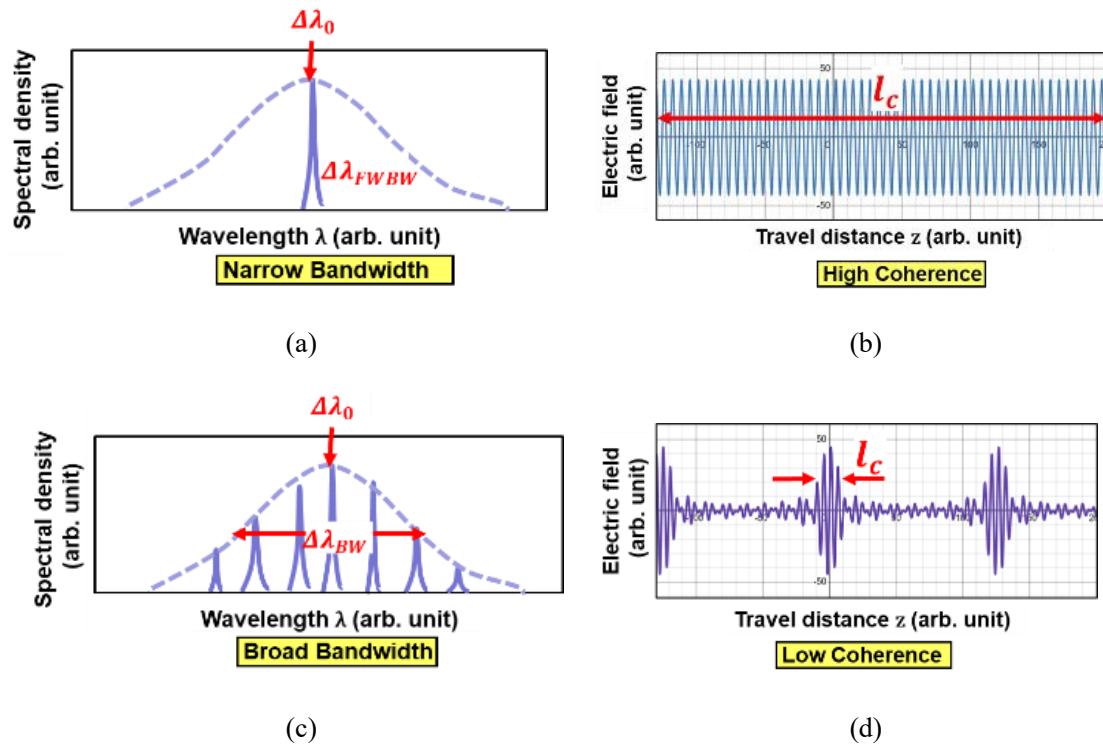


図 1.7: コヒーレンスに関する図 (a) シングルモード光源のスペクトル密度 (b) その電界波形 (c) マルチモード光源のスペクトル密度 (d) その電界波形

図は[35]を参考に著者が作成

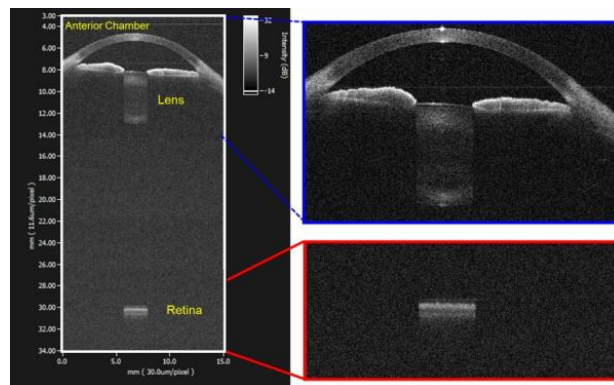


図 1.8: 前眼の OCT 画像 [37]

## 1.5 先行研究の問題と特定の課題

先行研究において図 1.6 に示した波長可変光源のレーザ出力の安定性が特性評価され、光ファイバ干渉光学系で評価すると、レーザの波長ゆらぎがみられた。レーザの発振波長の安定精度を直に観測する方法は容易ではないため、MEMS-VCSEL からの光は図 1.9 に示すような光干渉計のセットアップを通過し、干渉波形によるゆらぎを観測する方法を用いる。

光干渉計では、まず出力されたレーザが 2 つの光路に分割されたのち、再結合して干渉信号を形成する。この干渉信号の干渉縞は、デバイスの出力波長の経時的変化に対応し、出力波長は MEMS の変位に依存するため、干渉縞の間隔は MEMS ミラー自体の速度と相関しており、MEMS ミラーの動きの安定性を確認に使用できる[23]。

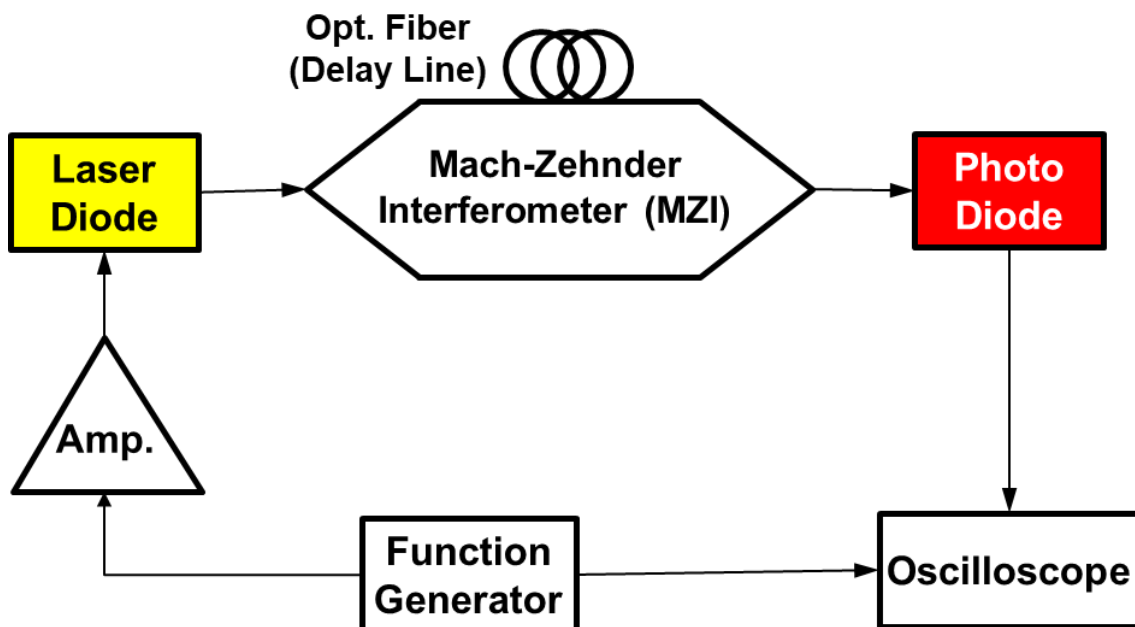


図 1.9: 波長安定性特性評価のための干渉計の概略図

図は[23]を参考に著者が作成

特に図 1.10 で示すように、本来は 100 Hz-200 Hz に見られるような安定した正弦波が推移した形の信号が得られるはずだが、50 Hz 以下の低周波領域では MEMS ミラーが動作すると、非正弦波状の波長が観測され、波の間隔の中断が見られるようなレーザの望まない周波数の動きが観察される問題があった。

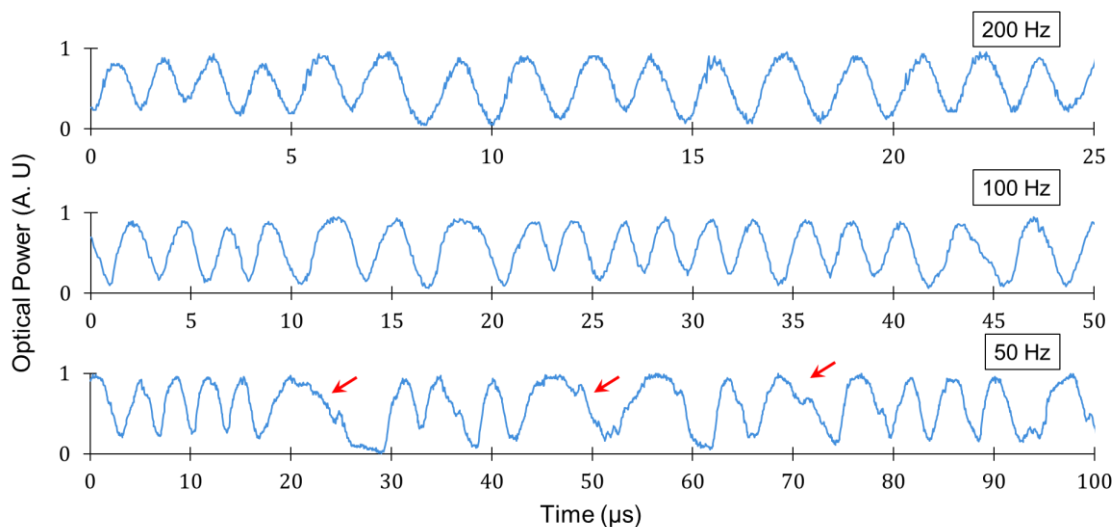
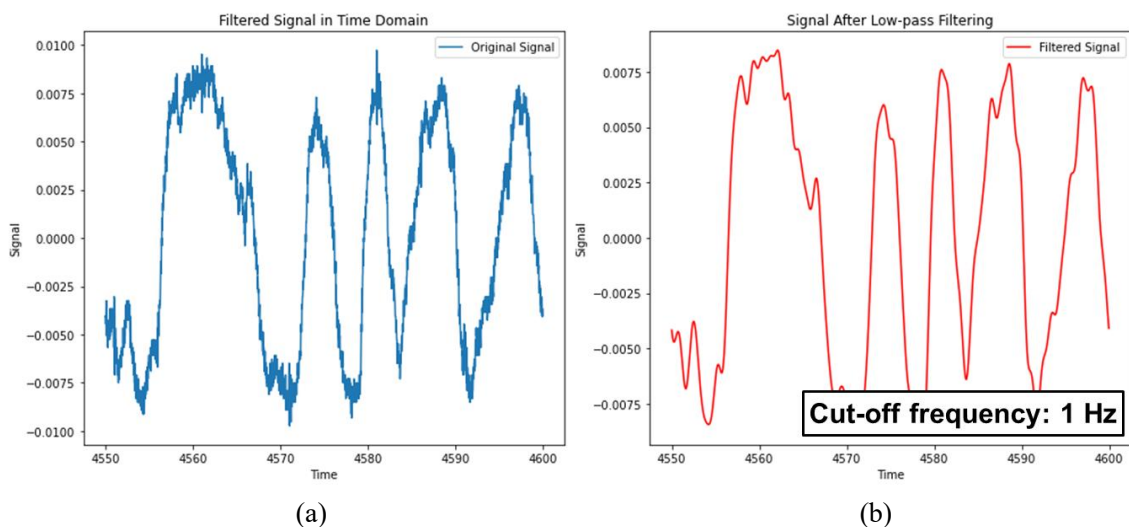


図 1.10: さまざまな MEMS 駆動周波数での MEMS-VCSEL 出力の光干渉計信号  
MEMS は 10~30 V<sub>AC</sub> で駆動，図は[23]を参考に著者が作成

図 1.10 に示したそれぞれのデータが，どのくらい非正弦波状であるかを定量的に表すことと最終目標に，Python を用いたデータ分析を行った．データに対し高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT)を行ったあと，ある周波数でローパスフィルタをかけ，逆フーリエ変換(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)で横軸を時間ドメインに戻した結果を以下の図 1.11 に示す．グラフからわかるように，カットオフ周波数 0.1 Hz~1 Hz の範囲でデータ分析したグラフに対して，本研究内では行わなかったが，望ましい規則的な正弦波グラフを比較することで，それぞれのデータを定量的に表せる可能性がある．



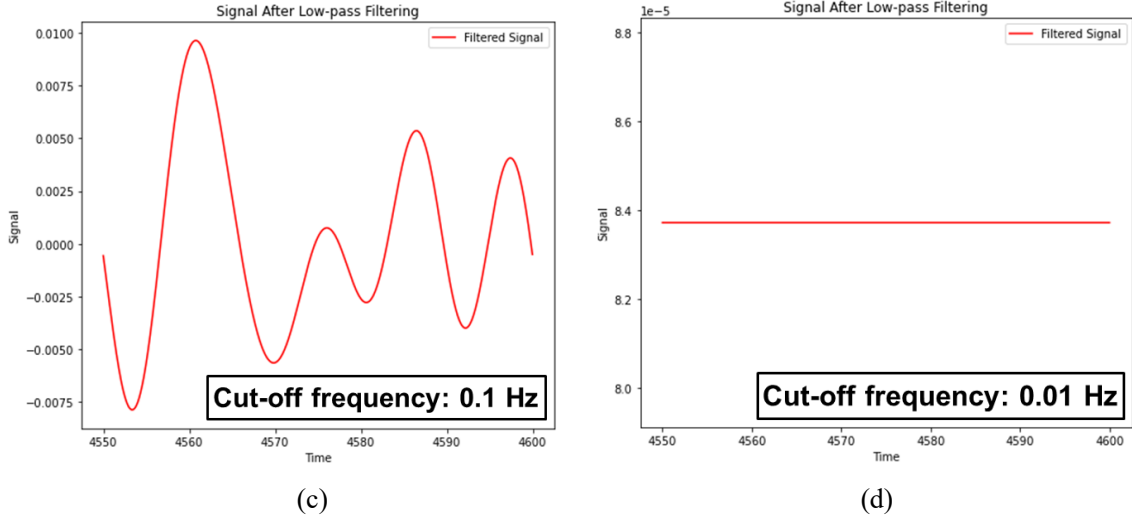


図 1.11: Python を用いたデータ分析 (a) 元のデータ (b) カットオフ周波数 1 Hz でローパスフィルタ後 (c) カットオフ周波数 0.1 Hz でローパスフィルタ後 (d) カットオフ周波数 0.01 Hz でローパスフィルタ後

## 1.6 レーザの波長ゆらぎの原因

第 1.5 節で示した問題が起きる原因のひとつとして、図 1.12 で示すように、波長調整用の静電駆動型 MEMS ミラーを下方に押し下げるレーザの光圧が考えられる。

一般に光力  $F_p$  は、

$$F_p = \frac{I \cdot Q}{c} (1 + R) \simeq 6.7 \times 10^{-9} \text{ N} \quad (1.3)$$

と表される[38]. ここで、レーザ出力  $I$  は  $I = 1 \text{ mW}$ , キャビティ  $Q$  値は  $Q = 1000$ , 光速  $c$  は  $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 高反射 (High Reflectance, HR) コーティングの反射率は  $R = 0.999$  とする。

一方、静電駆動力  $F_E$  は、駆動領域を  $S$ ,  $S$  の半径  $r$  を  $r = 200 \mu\text{m}$ , 電気定数を  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ , 初期ギャップ  $d$  を  $d = 4 \mu\text{m}$ , 変位を  $x$ , 駆動電圧  $V$  を  $V = 10 \text{ V}$  とすると、

$$F_E = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{(d - x)^2} V^2 \simeq 4.4 \times 10^{-6} \text{ N} \quad (1.4)$$

と表される。

式(1.3)と式(1.4)から、光圧は静電駆動力の約 1/1000 の割合で作用すると考えられ、波長安定性  $10^{-11}$  級を議論する上で無視できない。剛性の低いミラーサスペンションでは、光圧の影響が大きくなり波長不安定性につながる可能性がある[39]. そのため本研究では、より剛性が高く、光圧に耐えうる熱アクチュエータを概念実証として検討した。

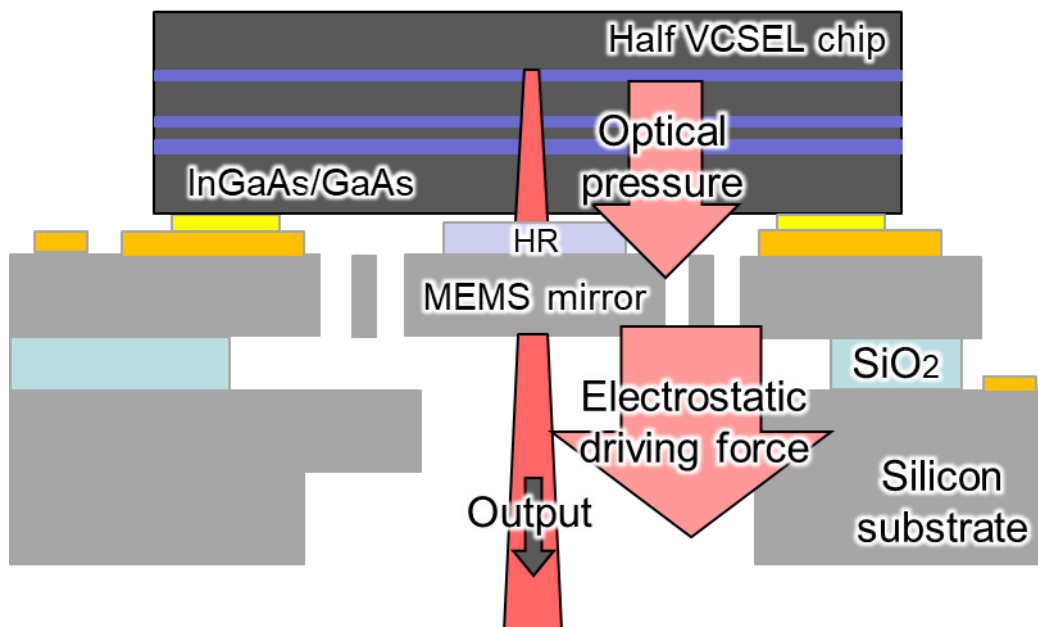


図 1.12: 静電駆動型 MEMS-VCSEL の光圧と静電駆動力の模式図

図は[35, 36]を参考に著者が作成

## 1.7 本研究の解決方策

詳細は第 2 章で記述するが，一般的に静電駆動型 MEMS の共振周波数は kHz~MHz の範囲にあり，それ以下の周波数では，MEMS 機構の質量に対して環境の空気分子の質量は無視できず，ブラウン運動に由来する熱雑音の影響が発生する．さらに，静電駆動力は変位に敏感であるため，わずかな変動が原子時計の精度を損なう可能性がある．そのため，本研究では機械的外乱の影響を受けにくい熱駆動機構に基づいたアクチュエータを設計・製作した．

従来報告されている波長可変光源のほとんどは高速波長掃引を目的としているものが多く，熱アクチュエータはほとんど使用されていない．しかしながら，小型原子時計に用いられる波長可変機構は，ガスセルを特定周波数で励起するレーザの製造時の波長ばらつきをポストプロセス的に微調整し，使用温度などの変動に伴うドリフトを補正することを目的としているため，そもそも高い周波数での変調は必要なく，DC から数 Hz の範囲の制御で十分である．むしろ熱アクチュエータの出力が比較的高いことを利用して可動構造の剛性を高め，機械的外乱に対するロバスト性を改善できる可能性がある．

また一般的に熱アクチュエータには，①電流が流れるために消費電力が大きく，②使用温度によっては発生変位と駆動電流の関係が一意に定まらない，③変位が構造・材料の残留応力に依存しやすいという問題がある．特に両端を固定したブリッジ型の熱アクチュエータ



構造においては、残留応力により機械的な座屈を発生することがあり、所望のアクチュエータ動作が得られないことがある[40]。このため本研究では、構造・材料と発生変位の関係を系統だてて調べるため、形状と寸法の異なるデバイスを 20 種類以上設計・製作した。その結果、特にシリコン酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ ) メンブレンの幅を変えて製作したデバイスを評価したところ、長さ／幅の比が 6 倍のときには、所望のモードの初期変形とその後の電流依存の変位を再現性良く発現できることがわかった。

## 1.8 本研究の意義

衛星測位とは、Cs 原子時計または Rb 原子時計が搭載されている GPS 衛星を 4 機用いて、それぞれの衛星が信号を送信した時刻情報から、正しい時刻、緯度、経度、高度を導く仕組みとなっており、衛星からの電波は 1 秒間に約 30 万キロ進むため、1 マイクロ秒の時刻のずれは 300 m の測距誤差を生む[41]。そのため小型原子時計の高精度化は重要であり、正確な時刻同期によって、高度なナビゲーション技術を必要とするドローンや空飛ぶクルマのほか、発展が期待される技術分野が多くある。

### 1.8.1 超高速取引

近年、金融市場では超高速取引 (High Frequency Trading, HFT) が重要で、公正で公平な金融市場を維持するために正確な時刻が必要である。日本では、世界最高水準の高速性・信頼性・拡張性を兼ね備えた、現物商品の売買システムの呼称である **arrowhead** の運用を 2010 年に開始し、注文応答時間は約 0.2 ミリ秒である[42]。アメリカの株式市場では、すべてのコンピュータシステムクロックと機械式タイムスタンプデバイスは、NIST の原子時計と 3 秒の許容範囲内で正確に同期されている必要があり、同期には任意のタイムプロバイダを使用できるが、この許容範囲には、NIST 標準とタイムプロバイダのクロックの差、ソースからの送信遅延、メンバー企業のクロックのドリフト量のすべてが含まれるため、たとえば、タイムプロバイダのクロックが NIST 標準の 1 秒以内の精度である場合、コンピュータシステムまたは機械式タイムスタンプデバイスの最大許容ドリフトは 2 秒である[43]。

HFT は時々刻々と変わる状況に応じて、金融商品の取引を短いスパンで高頻度に行って利益を得るため、遅延のない情報の処理が重要であり、各機器の高精度な時刻同期が求められる、この精度を有する数少ない時刻源として GPS 信号が用いられている[44]。



### 1.8.2 ITS (Intelligent transport systems)

ITS (Intelligent Transport Systems : 高度道路交通システム) とは, 最先端のエレクトロニクス技術を用いて人と道路と車両との間で情報の受発信を行い, ナビゲーションシステムの高度化, 安全運転の支援, 公共交通機関の利便性向上を図るものである. 道路交通が抱える事故や渋滞を解決するためのシステムの発展には, 高い時刻精度をもつ小型原子時計を用いた GPS が求められる[45].

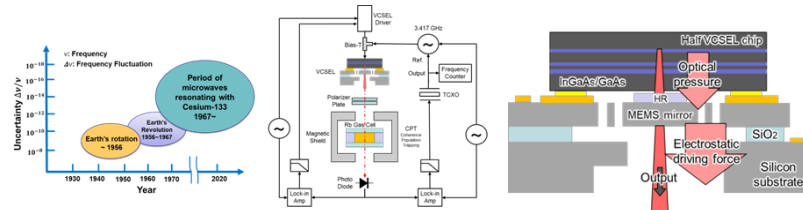
## 1.9 本研究の目的

本研究では, 小型原子時計用の波長可変光源としての, 静電駆動型 MEMS-VCSEL がもつ潜在的な問題を特定し, 波長安定性の向上を目指して VCSEL と組み合わせて使用する熱アクチュエータを設計および製作, 評価する. 具体的にはチップサイズが $3.2\text{ mm} \times 5.2\text{ mm}$ 以内, MEMS ミラーの変位が  $10\text{ nm}$  以上, DC-10 Hz の周波数範囲で動作し, 高周波ノイズ除去を備えた熱アクチュエータの製作が本研究の目的である. 図 1.13 に, 本研究の研究マップを示す.

## 第1章

### 序論

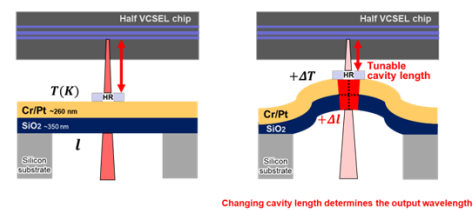
- ✓ 背景
- ✓ 本研究の目的



## 第2章

### 熱アクチュエータの理論

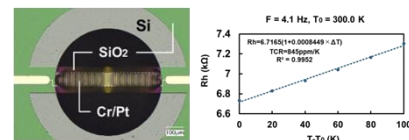
- ✓ MEMS-VCSELの波長可変
- ✓ 静電駆動型と比べた利点
- ✓ シミュレーション結果



## 第3章

### SiO<sub>2</sub>膜を用いた熱アクチュエータの製作

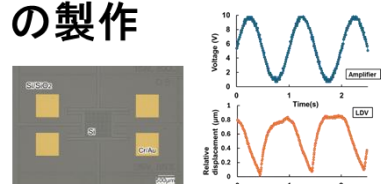
- ✓ デバイス構造, 製作プロセス
- ✓ 機械特性の評価
- ✓ 考察



## 第4章

### SOIウエハ用いた熱アクチュエータの製作

- ✓ デバイス構造, 製作プロセス
- ✓ 機械特性の評価
- ✓ 考察



## 第5章

### 結論

図 1.13: 本論文の章構成

## 第2章

# 熱アクチュエータの理論

### 2.1 MEMS-VCSEL の波長可変の原理

熱アクチュエータ (Electrothermal actuators, ETAs) は, MEMS で広く採用されている駆動原理の 1 つで, ジュール熱効果と熱膨張を利用して, 電気エネルギーを熱と変形エネルギーの両方に変換し, 構造的な動きを実現する[46]. 静電駆動型や圧電駆動型のアクチュエータと比較して, 材料の選択における柔軟性があり, 低コストの製造が可能で, 大きな変位能力をもつという利点がある[47]. 熱アクチュエータは主に, ホット&コールドアーム(U字型)[48], シェブロン(V字型)[49], バイモルフ[50, 51]の3種類が存在する.

本研究で提案する熱アクチュエータの原理は, バイモルフ機構と全体の熱膨張による座屈を利用して垂直方向の面外運動の実現を特徴としている. 図 2.1 に示すように, 2 種類の異なる熱膨張係数をもつ材料を組み合わせると, 温度上昇につれて熱膨張が発生し, 熱膨張が大きい材料は小さい材料側に向かって曲がる[52]. 長さの変化 $\Delta l$ は,

$$\Delta l = \alpha \Delta T l \quad (2.1)$$

と表される. ここで,  $\alpha$ は線膨張係数,  $\Delta T$ は温度変化である. 本研究では図 2.2 に示すようにデバイスの両端を固定し, 座屈により上下に振動する機構を利用する.

熱アクチュエータの表面部分は, より多くのジュール熱を発生させ, 大きな温度勾配を作成するために薄い電極で覆われている. 単位時間あたりのジュール熱である消費電力 $P$ は,

$$P = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (2.2)$$

と表される. ここで,  $I$ は電流,  $V$ は電圧,  $R$ は電気抵抗である. この式から定電流駆動の時には電気抵抗が大きいほど, 与えられた電流に対して発生するジュール熱が大きくなることがわかる.

また, 電気抵抗率 $\rho$ , 長さ $l$ , 断面積 $A$ を用いて, 電気抵抗 $R$ は,

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.3)$$

と表される,

## Coefficient of linear expansion $\alpha_1, \alpha_2$ ( $\alpha_1 > \alpha_2$ )

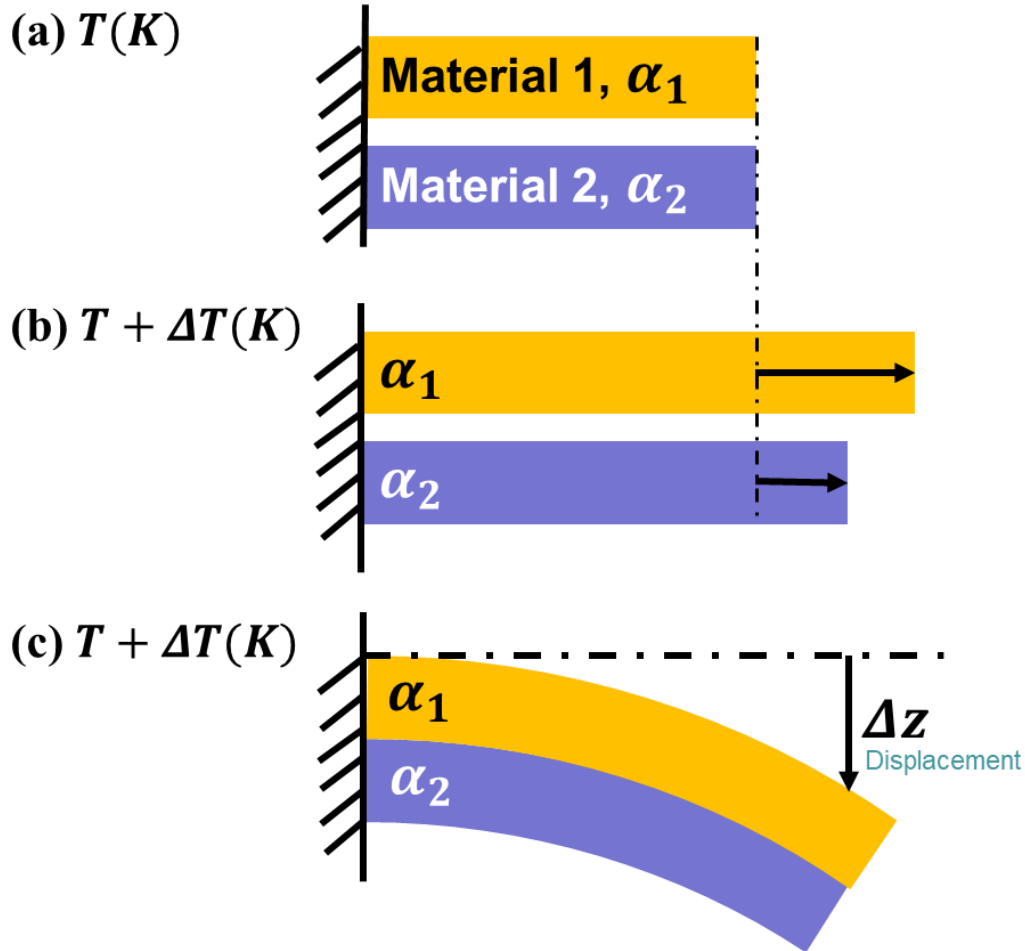
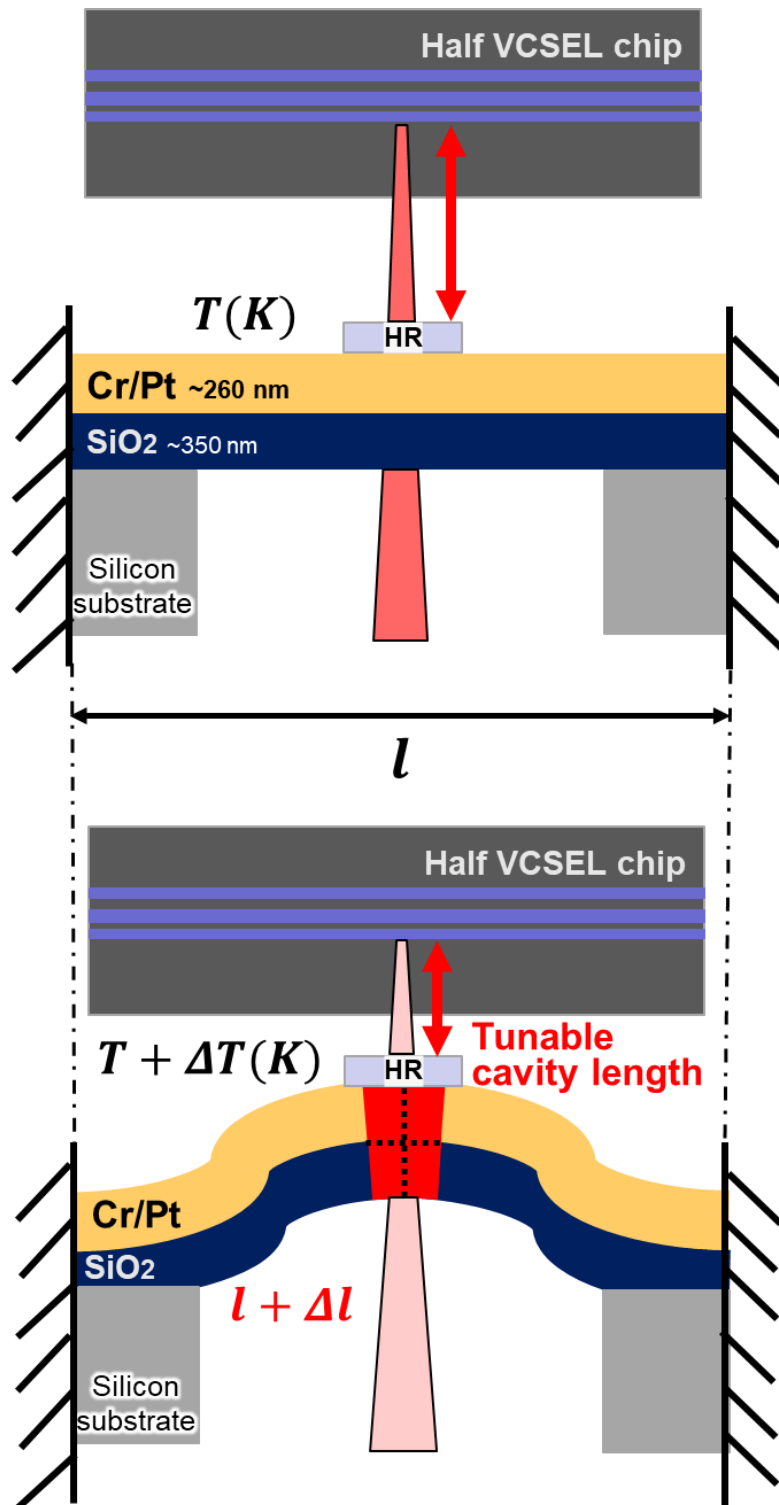


図 2.1: 熱膨張前後の 2 種類の材料の断面図 (a) 温度変化前 (b) 熱膨張後 (c) 2 種類の材料を張り合わせたときの熱膨張後

熱アクチュエータを MEMS ミラーとして使用し、ハーフ VCSEL と組み合わせると、アクチュエータの垂直方向の動きによって光キャビティ長を機械的に制御でき、レーザの波長可変性が得られる。先行研究より、レーザキャビティ長を変化させたときのレーザの発振波長は、1/2 波長ごとに同じ波長可変特性を繰り返すことがわかっている [53]。



**Changing cavity length determines the output wavelength**

図 2.2: 室温での熱アクチュエータの概略図(上)と, 熱膨張と座屈を起こしている状態(下)  
図は[36]を参考に著者が作成

本研究では、表 2.1 に示した高い電気抵抗率のため、最初に製作したデバイスに用いる主な電極用金属として白金 (Pt) を選択した。

表 2.1: 主な材料の物性値比較, 表は[54, 55, 56, 57]を参考に著者が作成

	Pt	Au	Cr	SiO <sub>2</sub>	Si
<b>Coefficient of linear expansion <math>\alpha</math> (<math>\times 10^{-6}</math> /K)</b>	<b>8.8</b>	<b>14.2</b>	<b>4.9</b>	<b>0.4</b>	<b>2.6</b>
<b>Young's modulus E (GPa)</b>	<b>170</b>	<b>70</b>	<b>279</b>	<b>70</b>	<b>160</b>
<b>Electrical resistivity <math>\rho</math> (<math>\times 10^{-8}</math> <math>\Omega</math>m) at room temperature</b>	<b><math>\sim 10</math></b>	<b>2.2</b>	<b>12.7</b>	<b><math>10^{24}</math></b>	<b><math>&gt;10^{11}</math></b>

## 2.2 静電駆動型と比べた利点

### 2.2.1 動作周波数範囲の違い

熱アクチュエータには、これまでの研究で使用された静電駆動型 MEMS に比べていくつかの利点がある。一般に 100 kHz を超える周波数で動作する静電駆動型 MEMS とは異なり、熱アクチュエータは通常 10 Hz 前後の比較的低い周波数で動作し、熱伝導／膨張の時定数が電気の時定数よりも遅いため、駆動電流に含まれる高周波ノイズの影響を比較的受けづらい。小型原子時計応用の目的の 1 つは、周波数が DC から数 Hz の範囲にある機械的振動や温度変化などの外乱による波長ドリフトを補正することであることを考慮すると、低い駆動周波数と広い波長可変領域が特に重要であり、小型原子時計応用に熱アクチュエータは静電駆動型 MEMS より適している可能性がある。

### 2.2.2 駆動力の違い

電気駆動信号の高周波ノイズの抑制に加えて、熱アクチュエータには、変位に比較的依存せずに力を及ぼすというさらなる利点がある。静電駆動型アクチュエータでは、たとえば光学的、電氣的、または振動的なノイズによる平衡位置からのわずかな摂動により平衡が乱れることがあり、その結果、サスペンションに望ましくない振動が発生する可能性がある。変

位に応じて変化する静電復元力と機械的復元力のバランスは、式(1.2)に示されており、アクチュエータが外部の影響によって平衡から外れた場合、両方の力がミラーを元の位置に復元しようとするが、力はミラーの変位に応じて動的に変化するため、平衡が回復する前に振動が発生し、レーザ出力波長の不安定性を引き起こす場合がある。対照的に、熱アクチュエータの位置は、平衡点から外部的に変位した場合でも、昇温によって引き起こされる長さの変化のみに依存する。この特性により、原理的には熱アクチュエータの方が静電駆動型 MEMS に比べて復元力の振動に対するロバスト性が高い可能性がある。

最後に、熱アクチュエータは熱膨張に基づいて動き、この場合、静電アクチュエータと比較して、光圧が無視できるほど大きな力で変形する。

まず、静電駆動力  $F_E$  は式(1.2)でも示したように、駆動領域を  $S$ 、電気定数を  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m、初期ギャップを  $d$ 、駆動電圧を  $V$  とすると、

$$F_E = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{d^2} V^2 \quad (2.4)$$

と表される。電場を  $E$  として、

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.5)$$

を用いて、単位面積当たりの静電応力  $P_E$  は、

$$P_E = \frac{F_E}{S} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (2.6)$$

と表される。 $E$  の代表値は  $V = 10$  V、 $d = 10$   $\mu\text{m}$  から  $E = 0.1$  MV/cm として、 $P_E = 4.4$  Pa である。

一方、熱アクチュエータの場合は、熱源からの熱流量を  $P$ 、 $\text{SiO}_2$  の厚みを  $L = 350$  nm、面積を  $S = 3.6 \times 10^5$   $\mu\text{m}^2$ 、温度変化  $\Delta T$  を用いて熱伝導率  $\kappa$  は、

$$\kappa = \frac{P \cdot L}{S \cdot \Delta T} \quad (2.7)$$

と表される。よって、式(2.7)は次のように書き換えられ、

$$\Delta T = \frac{P \cdot L}{S \cdot \kappa} \quad (2.8)$$

ここで、 $\text{SiO}_2$  膜の熱伝導率を  $\kappa = 1.38$  W/(m  $\cdot$  K) とする。 $P$  がジュール熱の場合、式(2.2)を用いて、

$$P = R \cdot I^2 = \rho \frac{l}{S} I^2 \quad (2.9)$$

ここでジュール熱を生み出す金属部分の抵抗率を  $\rho = 10.6 \times 10^{-2}$   $\mu\Omega \cdot \text{m}$ 、長さを  $l = 2.5 \times 10^4$   $\mu\text{m}$ 、断面積を  $s = 0.5$   $\mu\text{m}^2$  とすると、抵抗は  $R = 5.3$  k $\Omega$  である。印加電流を  $I = 0.21$  mA

とすると  $P = 2.3 \times 10^{-4} \Omega A^2$  より,  $\Delta T = 1.6 \times 10^{-4} \text{ K}$  である.

(2.1)式より, 熱膨張率は次のように表され, それをひずみ  $\varepsilon$  とすると,

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T = \varepsilon \quad (2.10)$$

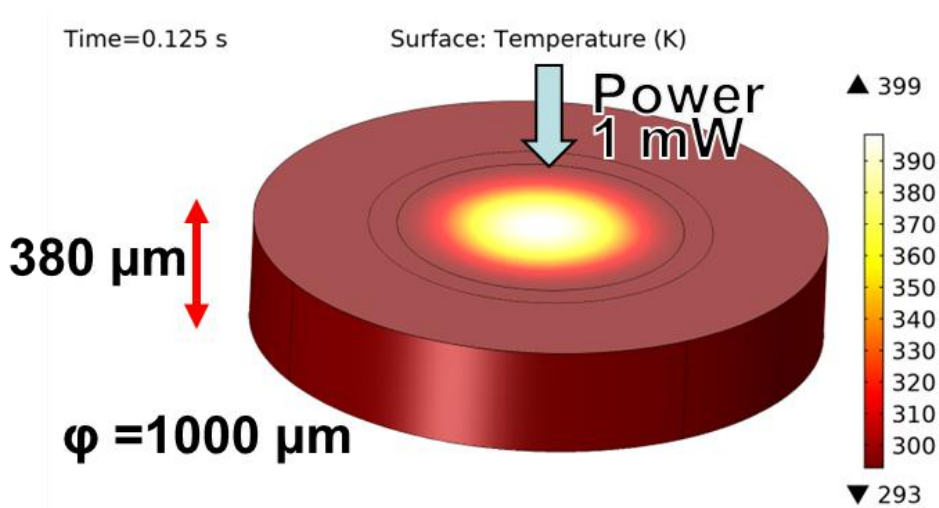
以上より, ヤング率  $E$  の材料ならば,  $\varepsilon$  相当のひずみを発生するための熱膨張の応力  $P_T$  は,

$$P_T = \varepsilon E = E \alpha \Delta T \quad (2.11)$$

と表される. ここで  $\text{SiO}_2$  のヤング率  $E=72 \text{ GPa}$ , 表 2.1 より  $\text{SiO}_2$  の線膨張係数は  $\alpha = 0.51 \times 10^{-6} / \text{K}$  から,  $P_T = 6.0 \text{ Pa}$  である. この応力は軸力方向であり, 軸から直交する向きの熱変形ではないが, 駆動条件を変えれば, 静電応力より熱膨張の応力の方が大きくなる可能性が示された.

## 2.3 熱アクチュエータの数値シミュレーション

製作する熱アクチュエータの数値シミュレーションを COMSOL Multiphysics® を用いて行った. 図 2.3 に示すように, デバイス上面の薄膜以外の部分はすべて室温 ( $293.15 \text{ K}$ ) で一定という仮定のもと, 中心の薄膜部分のみに  $1 \text{ mW}$  の電力をかけると,  $0.15 \text{ s}$  ほどで  $399 \text{ K}$  まで温度が上がることが分かった. ただしこの解析は, 微小構造物の熱容量と与えた熱量の比較なので, より正確なシミュレーションには周囲の熱源への熱放出も考慮する必要がある. 第 3 章で記載する製作したデバイスに印加する電圧と電流は, 以上のシミュレーション結果を考慮した値に決定した.



(a)



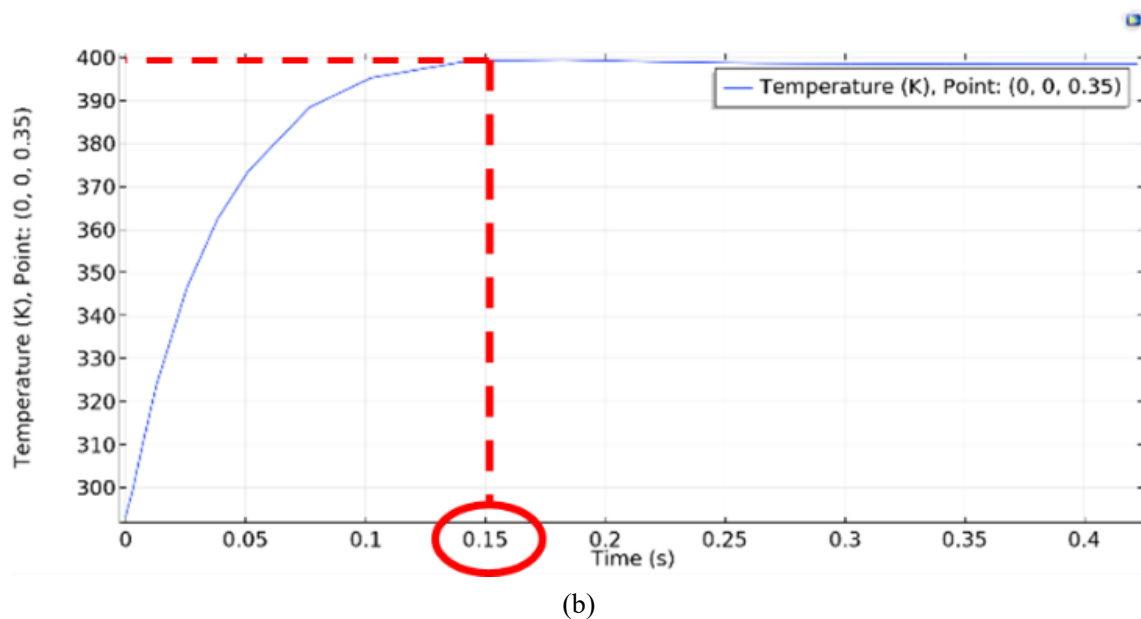


図 2.3: MEMS デバイスのシミュレーション結果 (a) 室温 (273.15 K) のデバイスに 1mW の電力をかけた場合, 0.15 s で 399 K まで温度が上がる事が分かる (b) デバイスの温度変化

## 2.4 第 2 章の結論

第 2 章では, まず熱アクチュエータの主な種類を記述したのち, バイモルフと座屈の 2 つの機構を利用した熱アクチュエータの原理について述べた. 熱アクチュエータは静電駆動型 MEMS に比べて, 動作周波数範囲が小型原子時計応用により適しているという利点がある. また熱アクチュエータの方が静電駆動型 MEMS よりも機械的外乱に対するロバスト性が高い点と, 理論値計算から応力が大きい可能性が示され, 第 1 章で述べた光圧によるレーザの波長ゆらぎの課題を解決する.

## 第3章

# SiO<sub>2</sub> 膜を用いた熱アクチュエータ の製作

### 3.1 MEMS デザインと製作プロセス

製作した熱アクチュエータは図 3.1 に示すように、SiO<sub>2</sub> 膜の上の Cr/Pt 抵抗器が生み出したジュール熱による熱膨張に基づいている。比較検討のため、表 3.1 に示すように、電気抵抗が 500 Ω～20 kΩ，キャビティサイズの半径  $r$  が 50 μm～1 mm，円形および正方形のキャビティ，膜の幅が  $r/3, r/2, r$ ，ビーム型アクチュエータおよび膜全体の形を含んだ 20 種類以上のデバイスを製作した。

表 3.1: 製作したデバイスのパラメタ範囲

Electrical resistance	500Ω ~ 20kΩ
Cavity Size	$r=50\text{ }\mu\text{m} \sim 1\text{ mm}$
Cavity	Round or square
Membrane width	$r/3, r/2, r$

Si 基板上の MEMS は図 3.2 に示すような下記の手順で製作を行った。マスクデザインを図 3.3 に、製作したウエハを図 3.4 に、デバイスの例を図 3.5 に、図 3.6 にデバイスの SEM 画像を示す。また、図 3.7 に示すように、リソグラフィでは最小線幅 2 μm のパターニングに成功した。

1. 380  $\mu\text{m}$  厚の Si 基板の 3 インチ試料の上に, 1100  $^{\circ}\text{C}$  の酸化炉内で 73 分間の湿式酸化によって熱酸化膜(350 nm) を形成した. (使用装置 : Koyo, KTF647N1-S)
2. スピンコーターを用いて試料上にフォトレジスト (S1818G) を 3000 rpm $\times$ 30 s で均一に塗布した.
3. ホットプレートを用いて 110  $^{\circ}\text{C}$  で 10 分間, 試料のベーキングを行った.
4. マスクレス露光機を用いて dose 量 900 (ツーリングファクタ) , defocus 条件 $\pm 0$  で  $\text{SiO}_2$  パターンを露光後, 現像液 NMD-3 を用いて 1 分間現像した. その後純水で 3 分間洗浄し,  $\text{N}_2$  ガスを用いて試料を乾燥させた. (使用装置 : Heidelberg Instruments, MLA150)
5. 緩衝フッ酸溶液 (buffered hydrofluoric acid, BHF) での 8 分間のウェットエッチングを行った.
6. 硫酸と過酸化水素水の混合比率が  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 = 3 : 1$  で構成された 110  $^{\circ}\text{C}$  の SPM (sulfuric acid-hydrogen peroxide mixture cleaning) 洗浄液にウエハを約 20 分間浸けることで, レジスト剥離を行った.
7. スピンコーターを用いて試料上にフォトレジスト (AZ5214E) を 4000 rpm $\times$ 30 s で均一に塗布した.
8. ホットプレートを用いて 110  $^{\circ}\text{C}$  で 50 秒間, 試料のベーキングを行った.
9. マスクレス露光機を用いて dose 量 30 (ツーリングファクタ) , defocus 条件 $\pm 0$  で電極パターンを露光したのち, 119  $^{\circ}\text{C}$  のホットプレート上で 2 分間, リバーサルベークを行い, 再度レジスト全面を一様に 3 分間露光した.  
なおここでリバーサルベークとは, 通常露光した部分が溶解しやすくなるポジ型レジストを用いて, 露光後に再度適切な時間をベーキングすることである. この工程後に露光した部分は不溶化するため, 等価的にネガ型レジストのように使用できる. 今回は微細な線幅のリソグラフィを得るために行った. (使用装置 : Union, PEM800)
10. 現像液 NMD-3 を用いて 2 分間現像した. その後純水で 3 分間洗浄し,  $\text{N}_2$  ガスを用いて試料を乾燥した.

11. RIE を用いて、O<sub>2</sub> ashing をガス圧力: 20 Pa, プラズマ電力: 50W, ガス流量: 100 sccm の条件下で 15 秒間, 残ったフォトレジストの除去を行った. (使用装置: Samco Inc., RIE-10NR)
12. スパッタ装置を用いて, Cr (5~10 nm) /Pt (250 nm) を成膜した. (使用装置: ANELVA, E-200S)
13. 超音波洗浄機を用いて, アセトン (CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>) を 100 % の設定で 3 分, エタノール (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) を 50% の設定で 2 分間リフトオフした. その後, N<sub>2</sub> ガスを用いて試料を乾燥した.
14. プロセス 17 で行う DRIE (Deep Reactive Ion Etching) のための保護膜としてデバイスの両面にアルミニウム (Al) を 250 nm ずつ蒸着した. (使用装置: ULVAC, VPC-260F)
15. スピンコーターを用いてウエハにフォトレジスト (S1818G) を 3000 rpm×30 s で均一に塗布し, ホットプレートを用いて 110 °C で 10 分間, 試料のベーキングをウエハの両面にそれぞれ行った. マスクレス露光機を用いて dose 量 900 (ツーリングファクタ), defocus 条件±0 で裏面に Si パターンを露光後, 現像液 NMD-3 を用いて 1 分間現像した. その後純水で 3 分間洗浄し, N<sub>2</sub> ガスを用いて試料を乾燥した.
16. Al etchant 液に 6 分間浸し, DRIE で掘る部分上の Al を取り除いた.
17. Cr/Pt 電極を上にした膜は, SiO<sub>2</sub> 自体を選択エッチング停止層として使用し, DRIE で裏面を 380 nm, エッチングを行う. (使用装置: SPP Technologies, Predeus)
18. 最後に不純物除去のため, まずアセトンに浸けた後, SPM 洗浄を 10 分間行い, 純水で洗浄ののち, N<sub>2</sub> ガスで乾燥した.

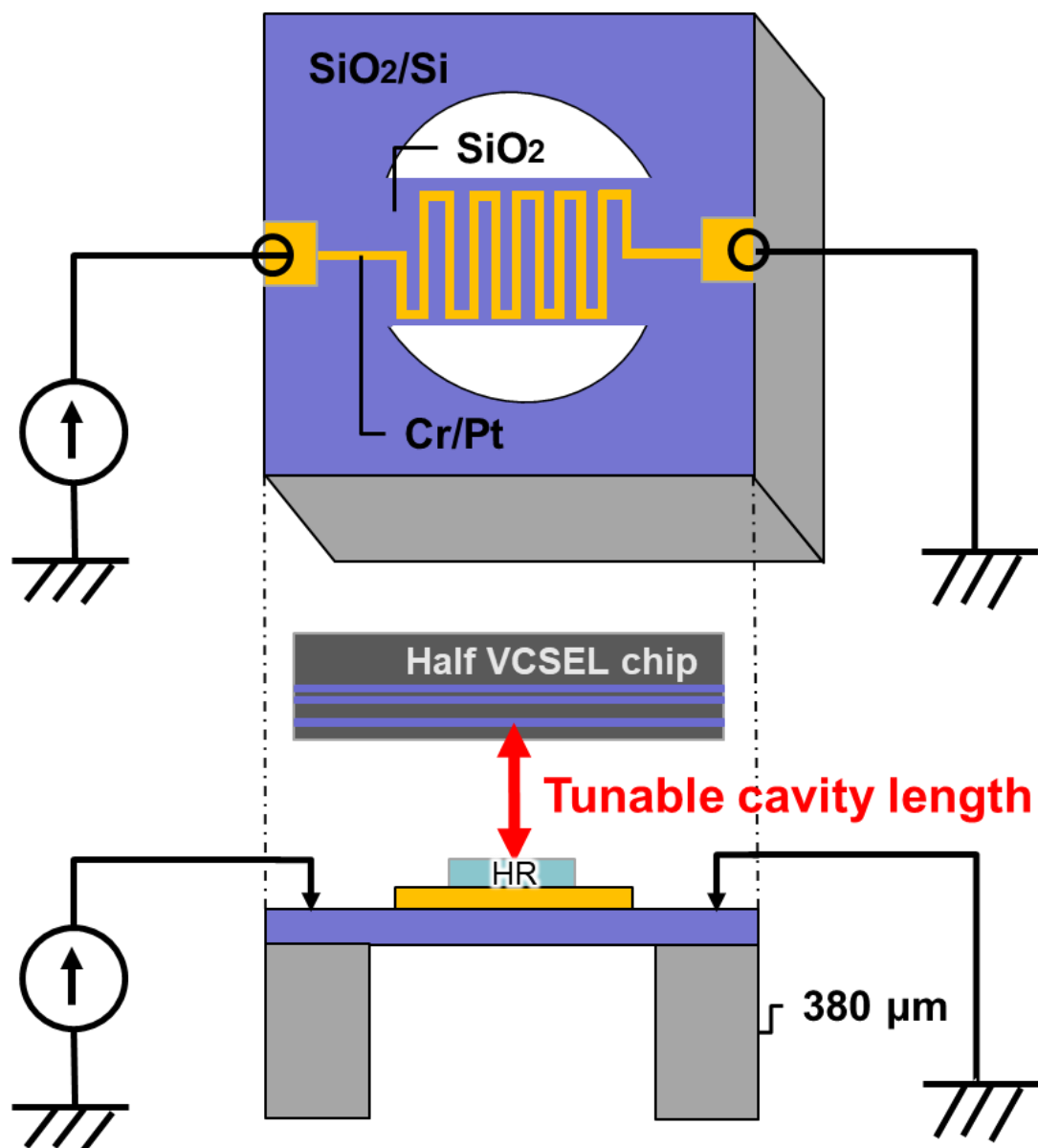


図 3.1:  $\text{SiO}_2$  膜を用いた熱アクチュエータ設計の上面図（上）と断面図（下）

図は[36]を参考に著者が作成

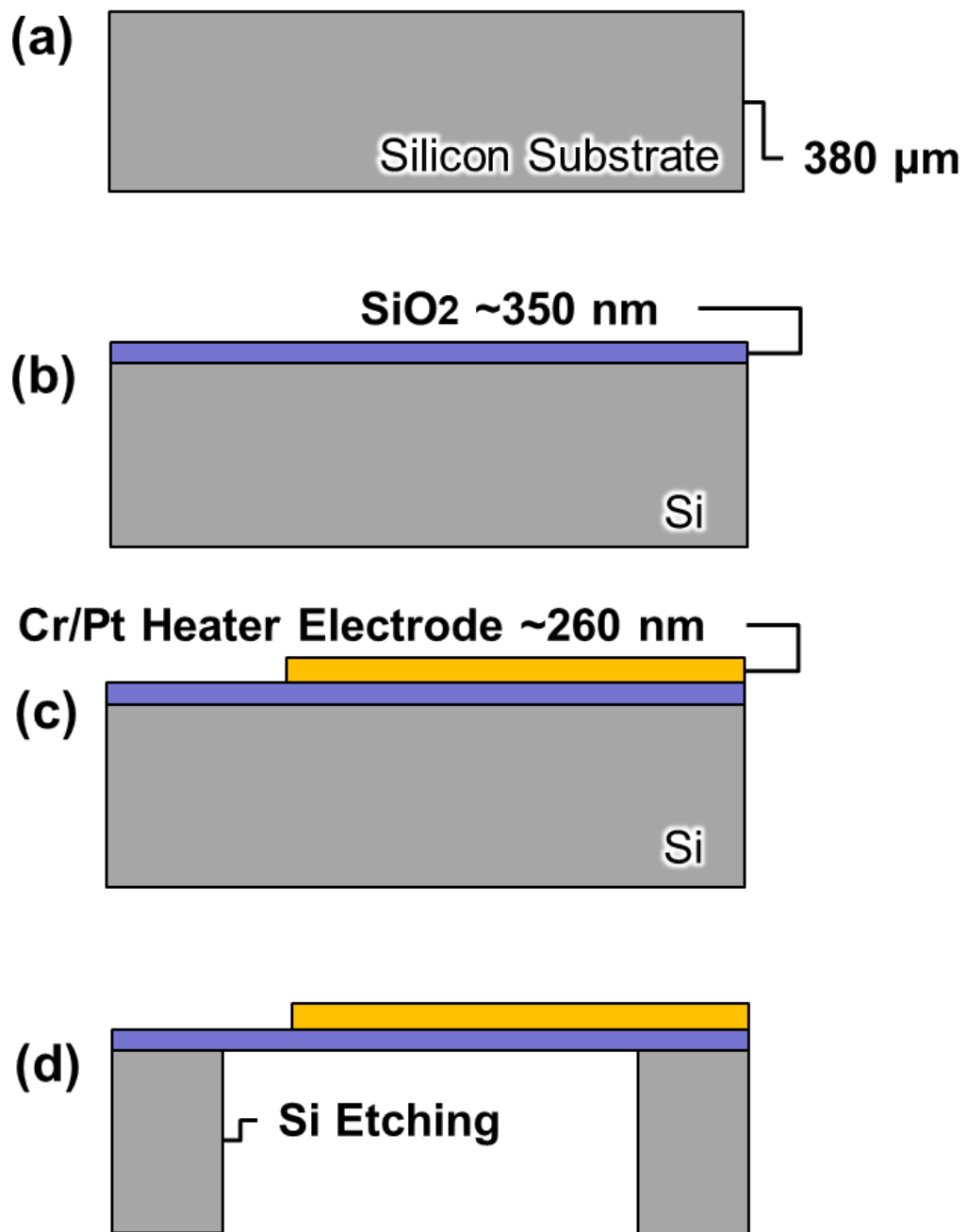
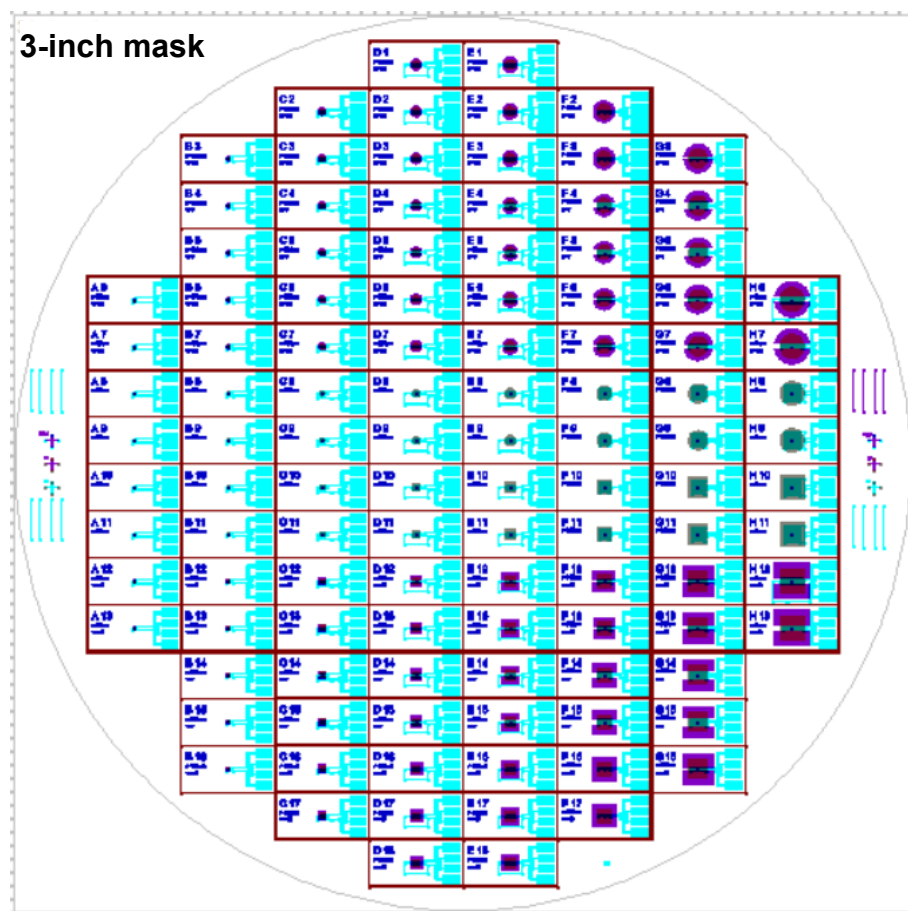
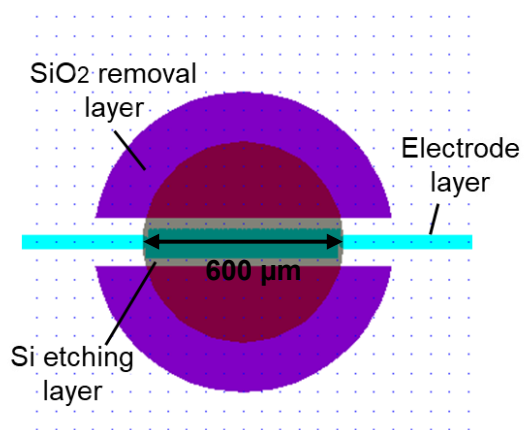


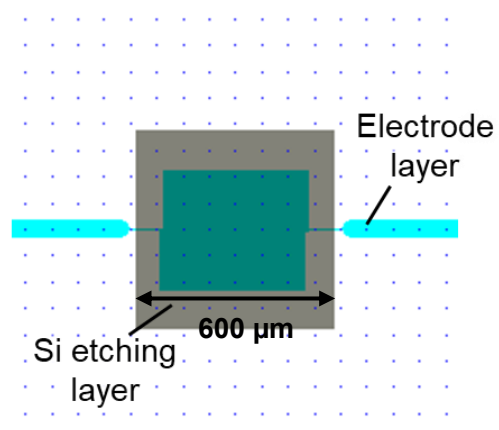
図 3.2: (a-d) MEMS 製作プロセスチャートの断面図  
図は[36]を参考に著者が作成



(a)



(b)



(c)

図 3.3: SiO<sub>2</sub> 膜を用いた熱アクチュエータの製作で使ったマスクデザイン  
(a) 3 インチサイズ Si ウエハに対するマスクデザイン (b-c) デバイスデザインの例

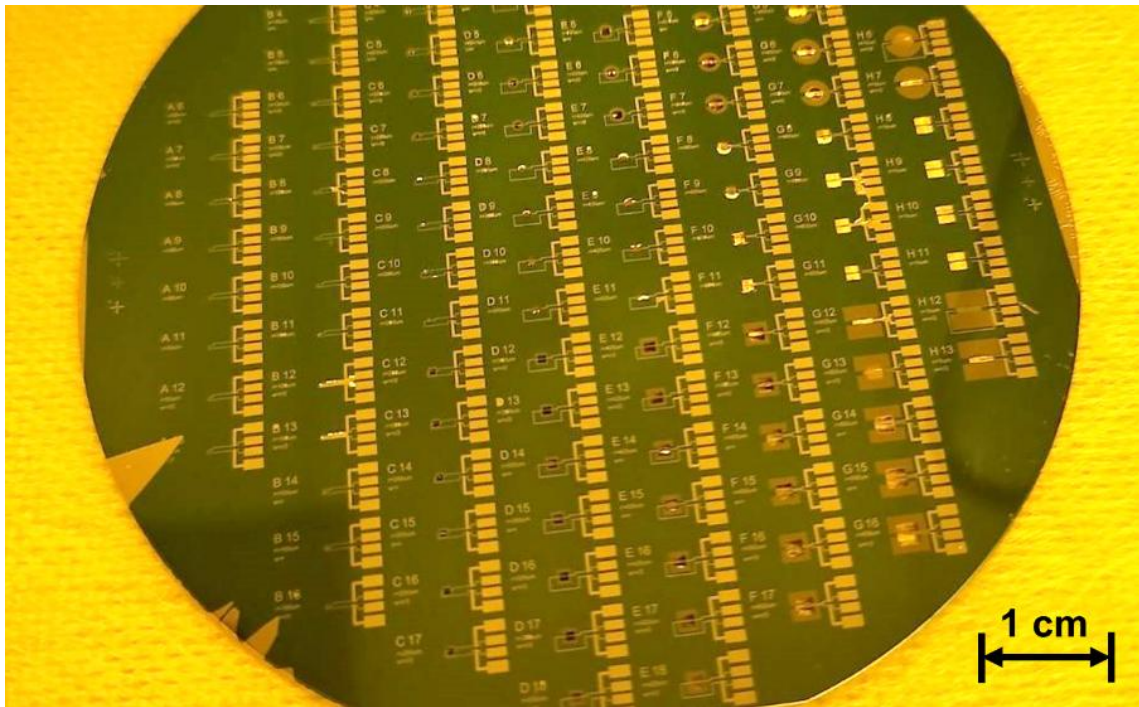


図 3.4: 製作したウエハ全体の写真

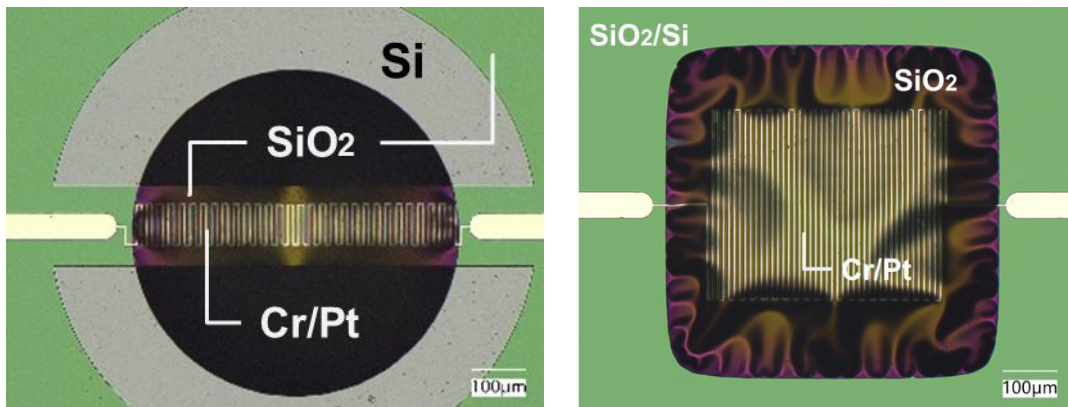
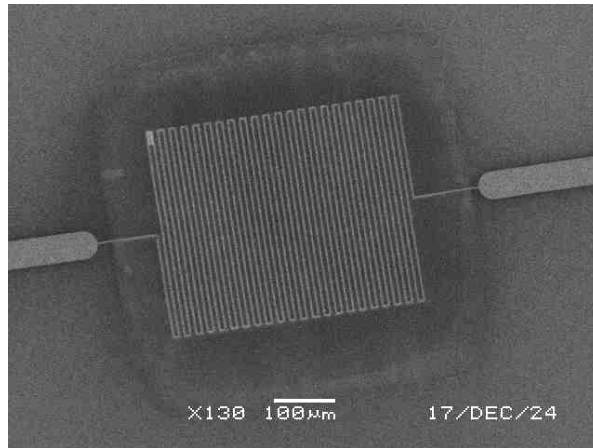
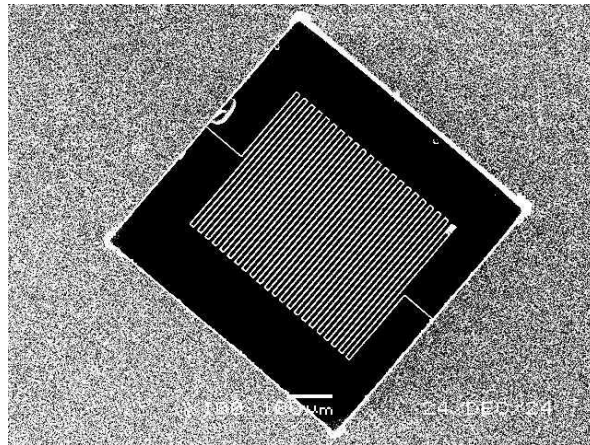


図 3.5: 製作したデバイスの例, 図は[36]を参考に著者が作成

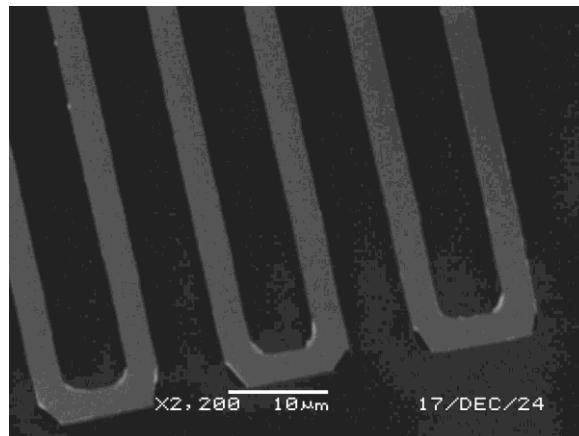




(a)



(b)



(c)

図 3.6: デバイスの SEM 画像 (a) 表側のデバイス全体図  
(b) 裏側のデバイス全体図 (c) 表側の電極画像

また、(2.9)式に示すように，なるべく大きなジュール熱を生み出すために，細い電極製作を行った．図 3.7 に示すように，レジスト AZ5214E を用いて  $2\mu\text{m}$  幅以下の電極製作に成功した．

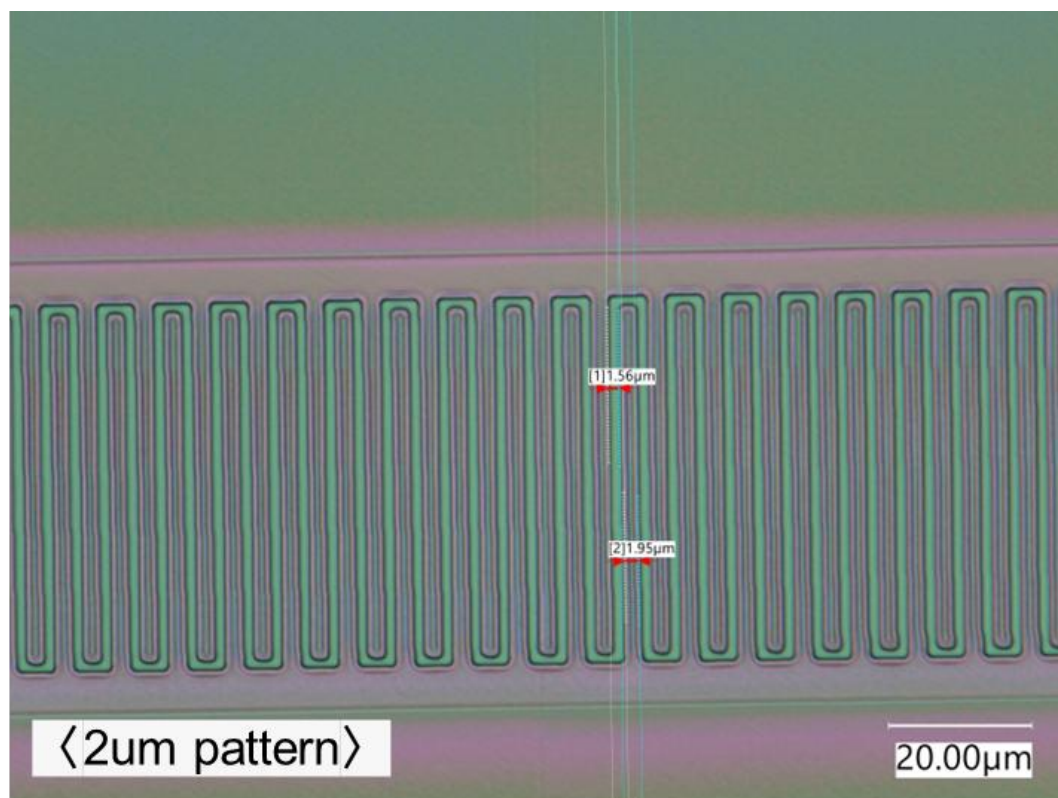


図 3.7: 製作に成功した電極用の  $2\mu\text{m}$  パターン

顕微鏡下でも，電流を流してメンブレンの形状変化を見るために，図 3.8 に示すように，ブレッドボード上にアルミニウムワイヤボンディングを行った．SMU (Source Measure Unit) から DC 電圧をかけたデバイスを顕微鏡で観察し，熱アクチュエータのメンブレンの複雑な形状を，過熱状態と緩和状態の両方で測定することを目的とした．結果として，加熱した状態のメンブレンの形状は測定できなかったが，図 3.9 に示す定常状態のメンブレンの形状を観察することができた．

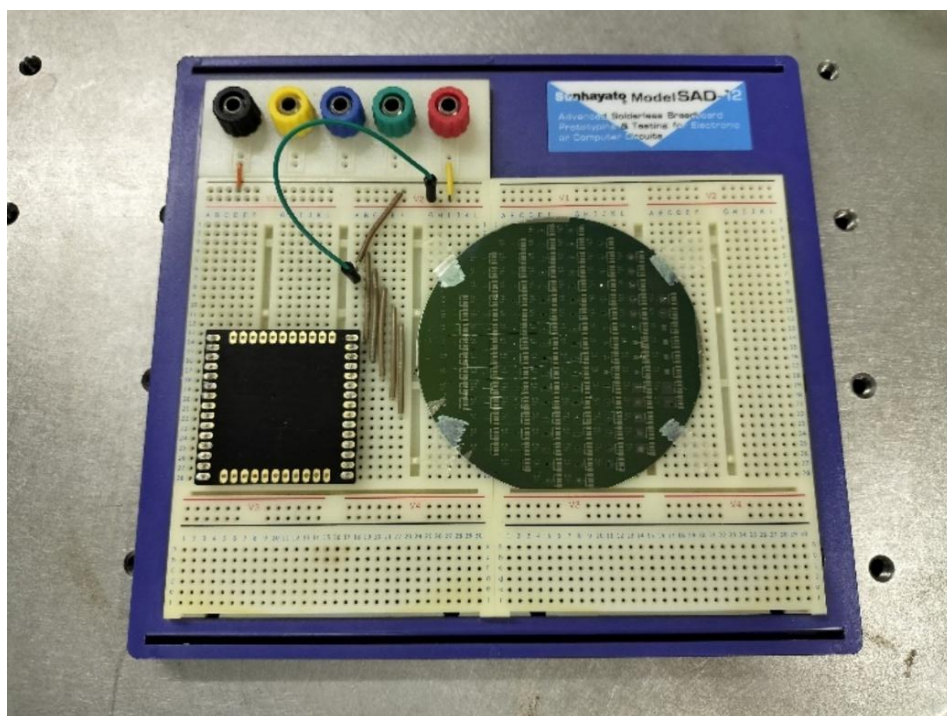
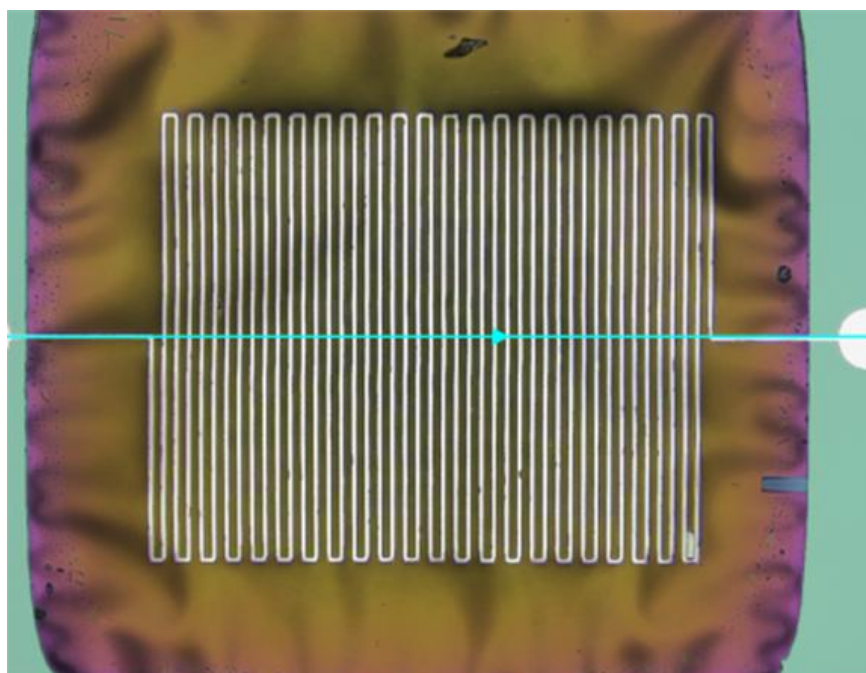
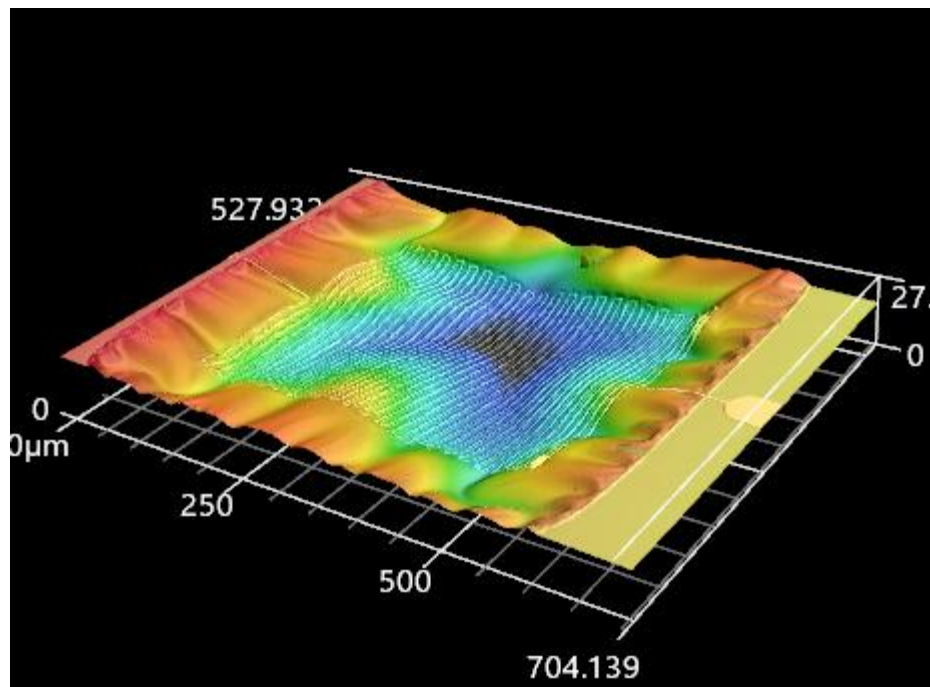


図 3.8: ブレッドボードに取り付けたデバイス

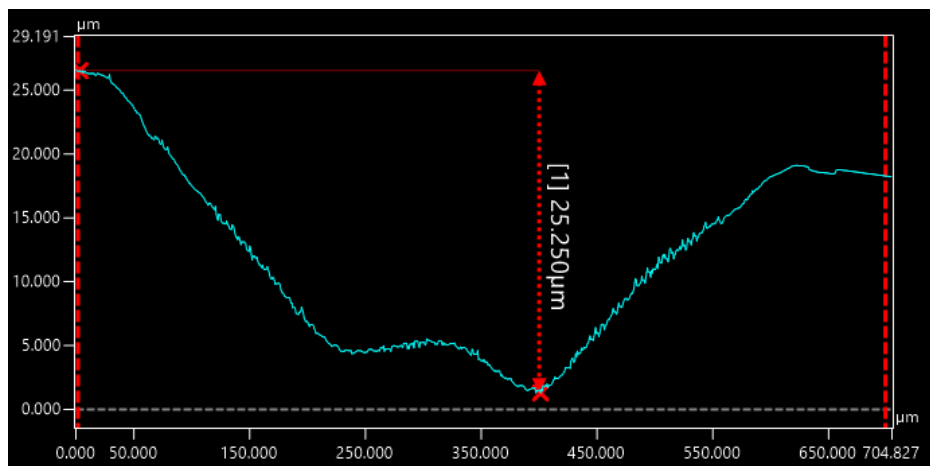


$\longleftrightarrow$   
 100 $\mu\text{m}$

(a)



(b)



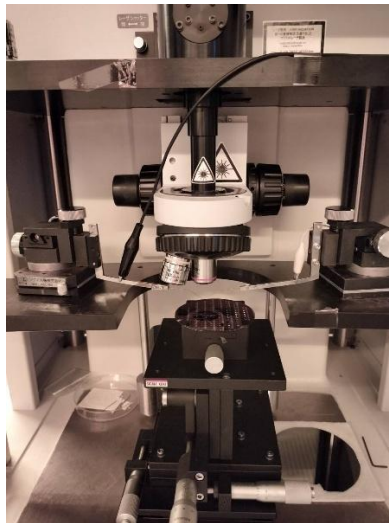
(c)

図 3.9: 形状解析レーザ顕微鏡によって取得した熱アクチュエータの 3 次元プロファイル  
 (a) 解析したデバイスの写真 (b) 電流印加されていない状態のメンブレンの 3 次元形状  
 (c) 電流印加前のメンブレンにみられる座屈による初期形状

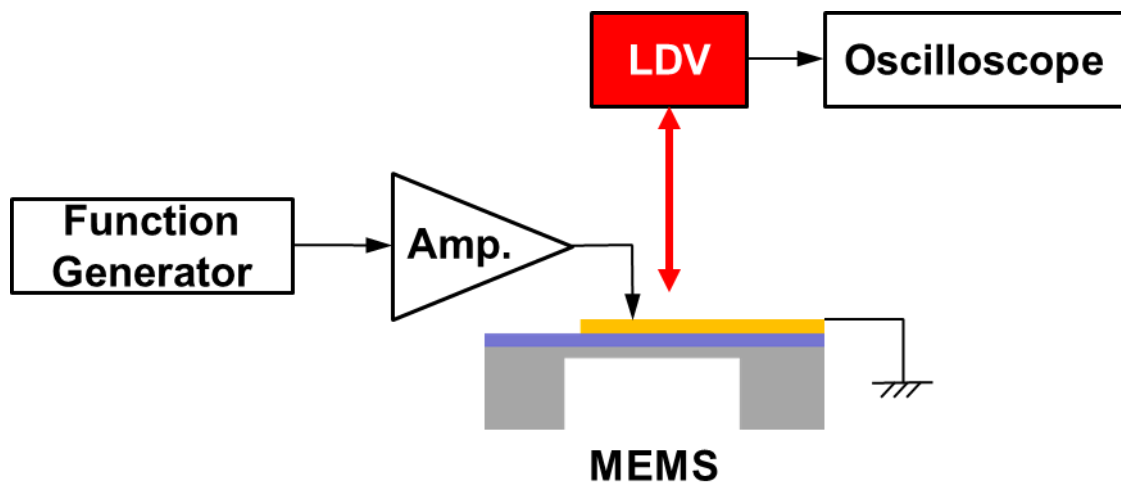
## 3.2 測定・評価

### 3.2.1 LDV

デバイスの動作検証のために，レーザドップラーシフト効果を利用して非接触で表面の振動の周波数と振幅を計測するレーザドップラー振動計 (Laser Doppler Vibrometer, LDV) を使用して熱アクチュエータの面外振動を評価した．（使用装置：NEO ARK, MLD-103）



(a)



(b)

図 3.10: LDV による機械特性評価実験の実験セットアップ

(a) LDV の装置写真 (b) LDV セットアップの模式図

### 3.2.1.1 変位測定

本実験の目的は、ヒーター電極に印加される電圧の振幅に対する MEMS の変位がどのように変化するかを調べることである。このテストでは、任意波発生器（使用装置：Keysight, 33220A）と増幅器（使用装置：NF, BA4825）を使用して AC 電圧を印加し、デバイスに電流を流した。電流によって電極にジュール熱が発生し、デバイスの熱膨張を引き起こした結果、デバイスの垂直変位が LDV で測定され、デバイスの動きを観察できる。図 3.11 は、電圧を印加すると熱アクチュエータが上下に振動することを示している。先述のシミュレーション結果を参照して、周波数約 10 Hz で任意波発生器を用いて、室温で  $8.9\text{ k}\Omega$  の電気抵抗を持つデバイスに、 $10\text{ Vpp}$  (peak-to-peak) の AC 電圧をかけた。ここで相対変位のグラフの上方向はデバイスが垂直上向き動いていることを示しており、このデバイスでは電圧を印加するとデバイスは垂直下向きに動いていることが分かる。

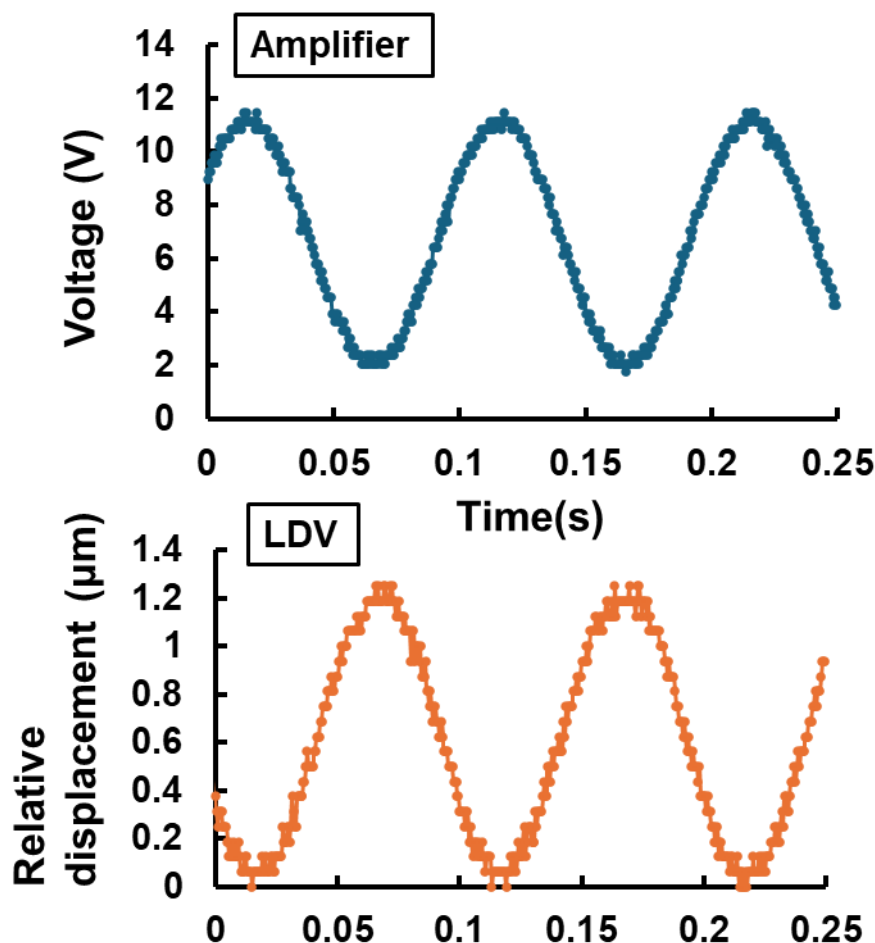


図 3.11: MEMS 印加電圧（上）とレーザドップラー振動計で測定した MEMS 変位（下）

図は[36]を参考に著者が作成



### 3.2.1.2 周波数応答

1 辺が  $600\ \mu\text{m}$  の正方形キャビティサイズの，四辺を固定した膜状デバイスに， $10\ \text{V}_{\text{pp}}$  を印加したときの上下動の周波数特性を図 3.12 に示す．

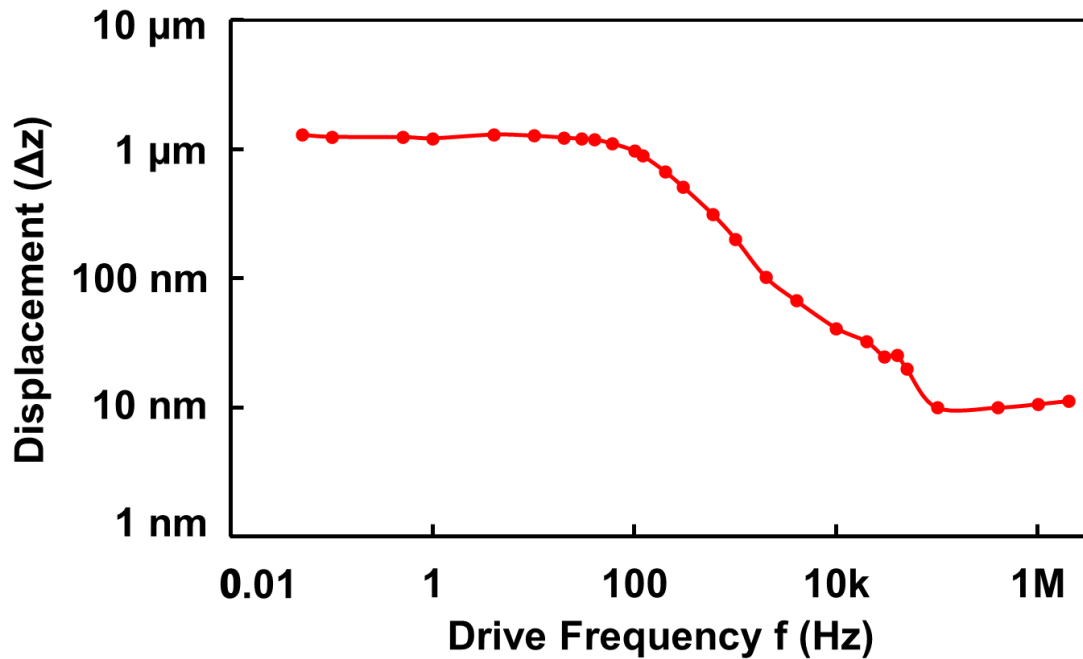


図 3.12: MEMS 周波数応答．デバイスは  $10\ \text{V}_{\text{pp}}$  の AC 電圧で駆動  
駆動周波数と変位は対数グラフ化されていることに注意，図は[36]を参考に著者が作成

### 3.2.2 有効抵抗温度係数計測

動作中のデバイスの温度を変化する抵抗を評価するために，デバイスの有効抵抗温度係数 (Temperature Coefficient of Resistance, TCR) を測定した．この実験は，東京大学生産技術研究所野村研究室の Dr. Laurent Jalabert 国際研究員の協力のもと行った．デバイスは DC から数 Hz までの低周波数で動作することが予想されるため，TCR も同じ周波数範囲で測定し，測定原理は，3 オメガ法 [58, 59] を使用している．AC 電流 (使用装置:Lakeshore, AC155) は，金属マイクロワイヤに周波数  $f$  で供給され，結果として得られる実効値電圧は，ロックインアンプ (使用装置:NF, LI5650) によって周波数  $f$  で測定される．インピーダンスは，実効値電圧を実効値供給電流で割ることによって得られ，抵抗は複素インピーダンスの振幅である．測定は，真空プローブステーションで  $300\ \text{K}$  から  $400\ \text{K}$  の範囲のさまざまなホルダー温度で繰り返され，図 3.14 に示すようにデバイスの TCR は，注入電流  $0.21\ \text{mA}$  に対して  $4.1\ \text{Hz}$  で  $845\ \text{ppm/K}$  であることがわかった．

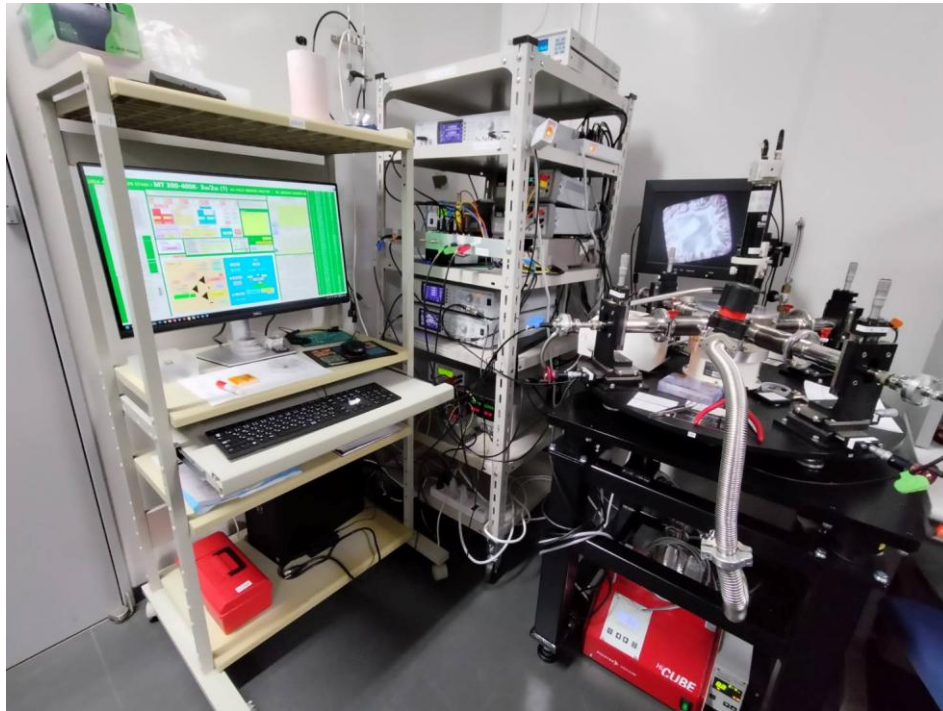


図 3.13: 東京大学野村研究室の抵抗温度測定セットアップ

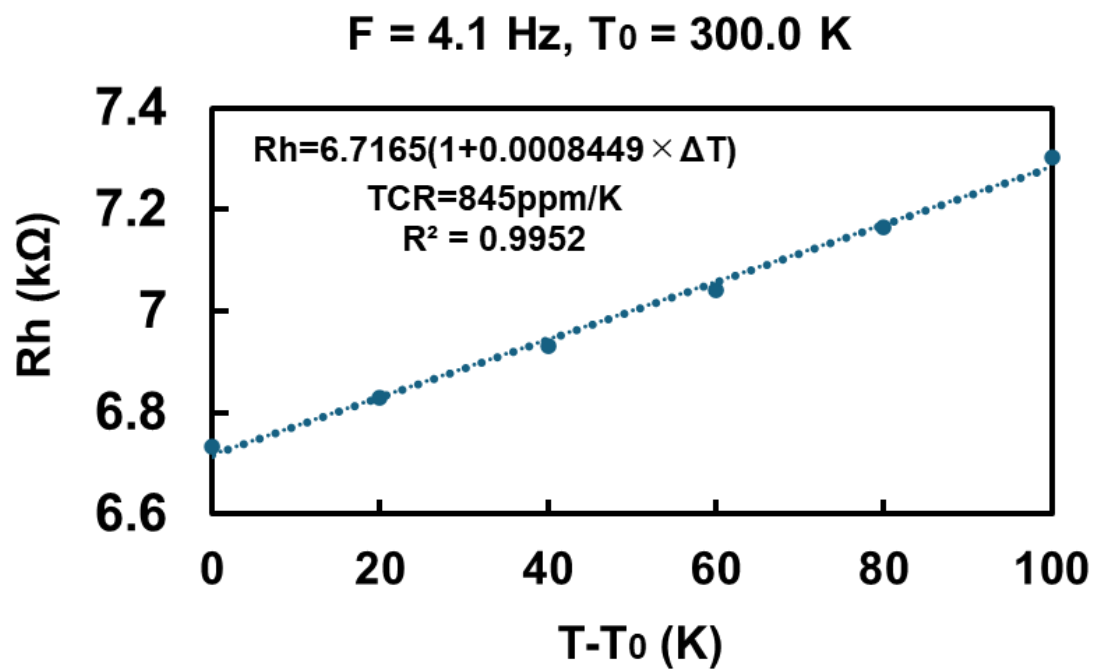


図 3.14: 製作したデバイスの抵抗温度係数を示すグラフ，図は[36]を参考に著者が作成



### 3.3 考察

LDV の結果が示すように、熱アクチュエータは印加電圧と同じ周波数で垂直運動を誘起し、10 Vpp の駆動信号での変位は 1250 nm である。この実験では、オシロスコープの測定値を確認しながら任意波発生器と増幅器を使用している。印加電圧が負の値になった場合も、発熱量は電流の 2 乗になり、正の値の場合と同様に熱アクチュエータは通電加熱されるため、駆動電圧が正負を繰り返すことで本来目的とする周波数の 2 倍の周波数で熱アクチュエータが動作する可能性がある。よってオシロスコープによる測定値の分解能の限界により、最小値を限りなく 0 に近づけたが、0 に設定することはできなかった。つまり可動部分の動きは、完全に電圧がかかっていない緩和状態がない結果だと考えられる。

また周波数応答プロットでは、デバイスの最大変位は 4 Hz で発生し、100 Hz を超える周波数では膜の動きが比較的小さく、デバイスが高周波信号を効果的に除去することを示した。式(2.2)を用いると、LDV 測定での駆動電力  $P$  は  $P = 11 \text{ mW}$  程度と計算された。チップサイズが  $3.2 \text{ mm} \times 5.2 \text{ mm}$  以内で、MEMS ミラーの変位が 10 nm 以上、DC-10 Hz の周波数範囲で動作し、高周波ノイズ除去を備えた熱アクチュエータの製作という本研究の目的は達成された。

TCR 測定の線形フィッティングは、フィッティング係数が 0.9952 で 1 に近いいため線形性が高いと考えられる。この TCR 値は、MEMS デバイスの温度と入力電力を直接相関させることができるため、アクチュエータの実際の操作にとって重要であり、LDV 実験からの変位データと組み合わせると、抵抗の変化を介して温度を監視し、駆動信号電力を制御することで、MEMS デバイスの動作変位を調整可能である。

今回、裏側 Si の DRIE のプロセス後、SiO<sub>2</sub> メンブレンに残留応力による膜面のたわみが多く存在する問題があった。図 3.15 に示すように、比較検討のため製作したいくつかのデバイスの動きを、電流をかけて観察したところ、長さ と 幅 の比が 1:1 のメンブレンに対して、6:1 のときには、所望のモードの初期変形とその後の電流依存の変位を再現性良く発現することがわかった。メンブレンの他に比べて明るく見える部分は、膜が光を最も反射する光軸に直交する部分だと考えられる。

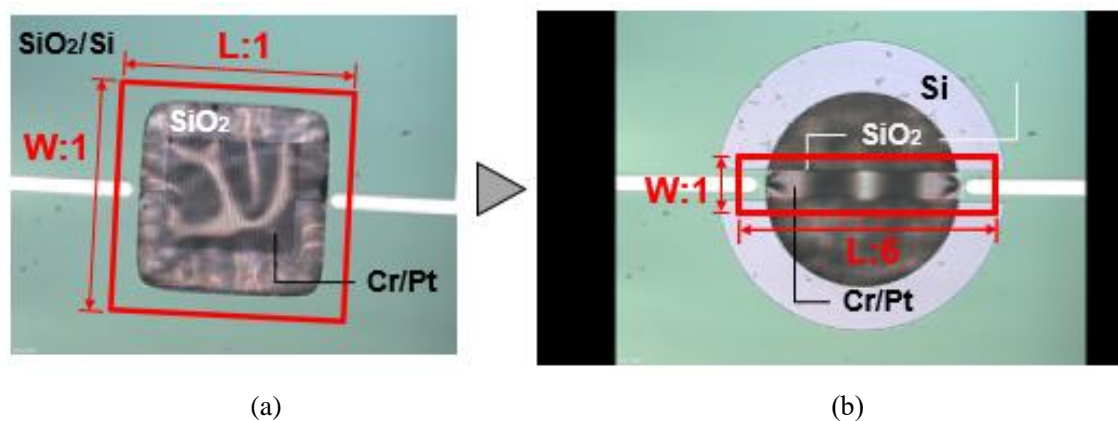


図 3.15: SiO<sub>2</sub> メンブレンの表面画像 (a) 長さ／幅が 1 (b) 長さ／幅が 6

### 3.4 第 3 章の結論

第 3 章では、波長可変光源としての MEMS-VCSEL における現在の課題に対して有効だと考えられた、SiO<sub>2</sub> の熱膨張により垂直に動く座屈タイプの熱アクチュエータを設計し、シミュレーションを行った。また、実際に印加電圧の駆動周波数と同じ周波数で上下に振動する SiO<sub>2</sub> 薄膜を備えた熱アクチュエータの製作に成功した。デバイスの周波数応答を見ることで、確かに熱アクチュエータが高周波信号を効果的に除去することが示された。TCR 測定で同デバイスの抵抗温度係数が求められ、デバイスの抵抗の変化を介して温度を監視し、駆動信号電力を制御することで、MEMS デバイスの動作変位を調整可能であることがわかった。

## 第4章

# SOI ウェハを用いた熱アクチュエータの製作

### 4.1 MEMS デザインと製作プロセス

第3章では電極を積層する絶縁膜として  $\text{SiO}_2$  を使用したが、図 3.5 で顕著にみられたように、メンブレンには残留応力による膜面のたわみが多く存在する。そのため、ここでは  $\text{SiO}_2$  絶縁膜の上に Si 層が形成された構造の基板である SOI をベースとした新たなデバイスを製作した。

まず、実際に使用した SOI ウェハの表面の Si の厚みをプロファイラーで計測したところ、図 4.1 に示すように  $10\ \mu\text{m}$  であった。（使用装置：KLA-Tencor, Alpha-Step D-120）

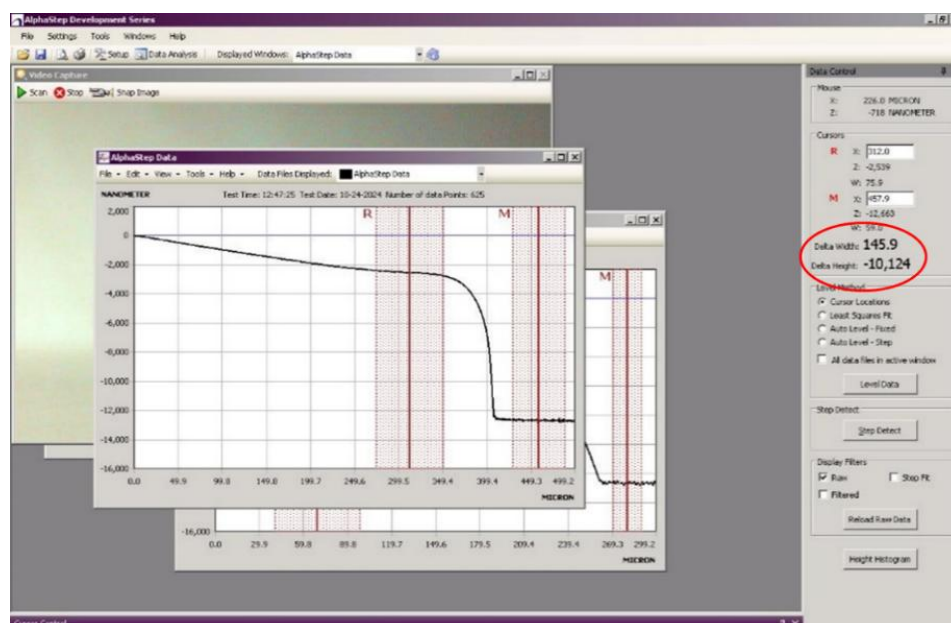


図 4.1: プロファイラーによる Si の厚み測定

新たに製作した熱アクチュエータのデバイス構造は図 4.2 に示す通りである．今回実際には Si 基板の裏側 DRIE を行わなかったが，VCSEL とボンディングし，レーザ光源を組み立てる際には必要な工程である．電極パッドを通じてプローブから Si 層に電流を印加し，可動膜とつながるための細い Si では，式(2.3)から抵抗が大きくなる．この Si サスペンション部分で生み出されたジュール熱による熱膨張で，基板面外方向の変位が発生する．

また，デバイス可動部の下に SiO<sub>2</sub> 層を均等にフッ酸で除去するため，膜には直径 20  $\mu\text{m}$  のリリースホールを等間隔で並べた．

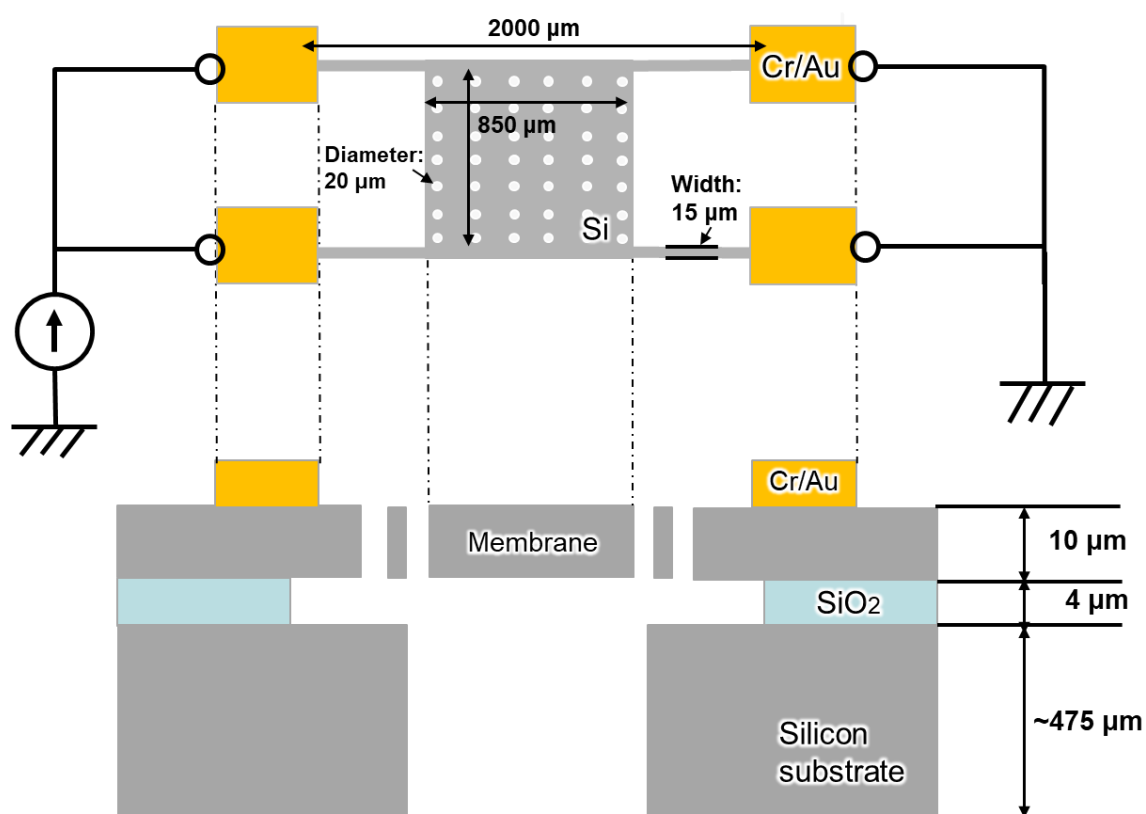


図 4.2: Si 層を可動構造に用いた熱アクチュエータの上面図（上）と断面図（下）

また，デバイス製作前に SiO<sub>2</sub> 膜を用いた熱アクチュエータと同様に，図 4.3 に示すような SOI ウエハを用いた熱アクチュエータの数値シミュレーションを COMSOL Multiphysics® を用いて行った．

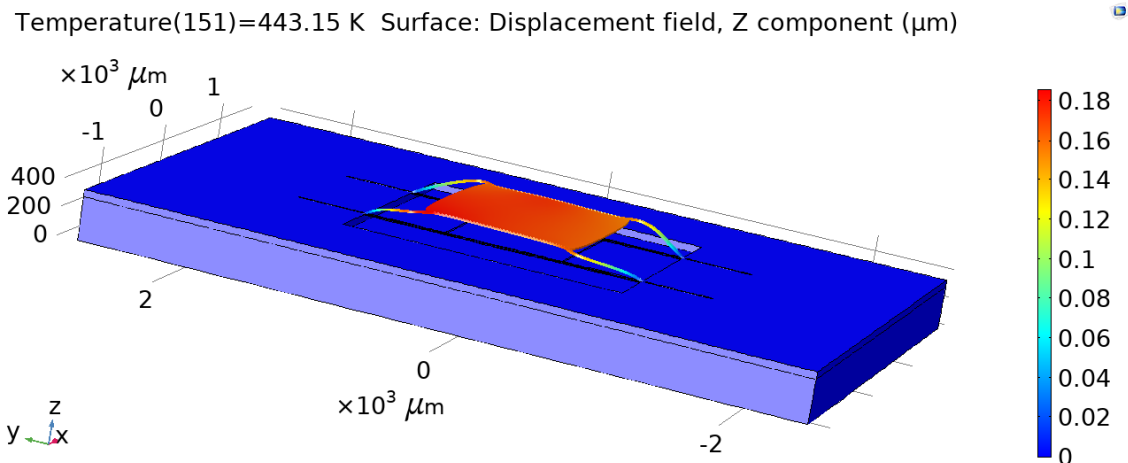


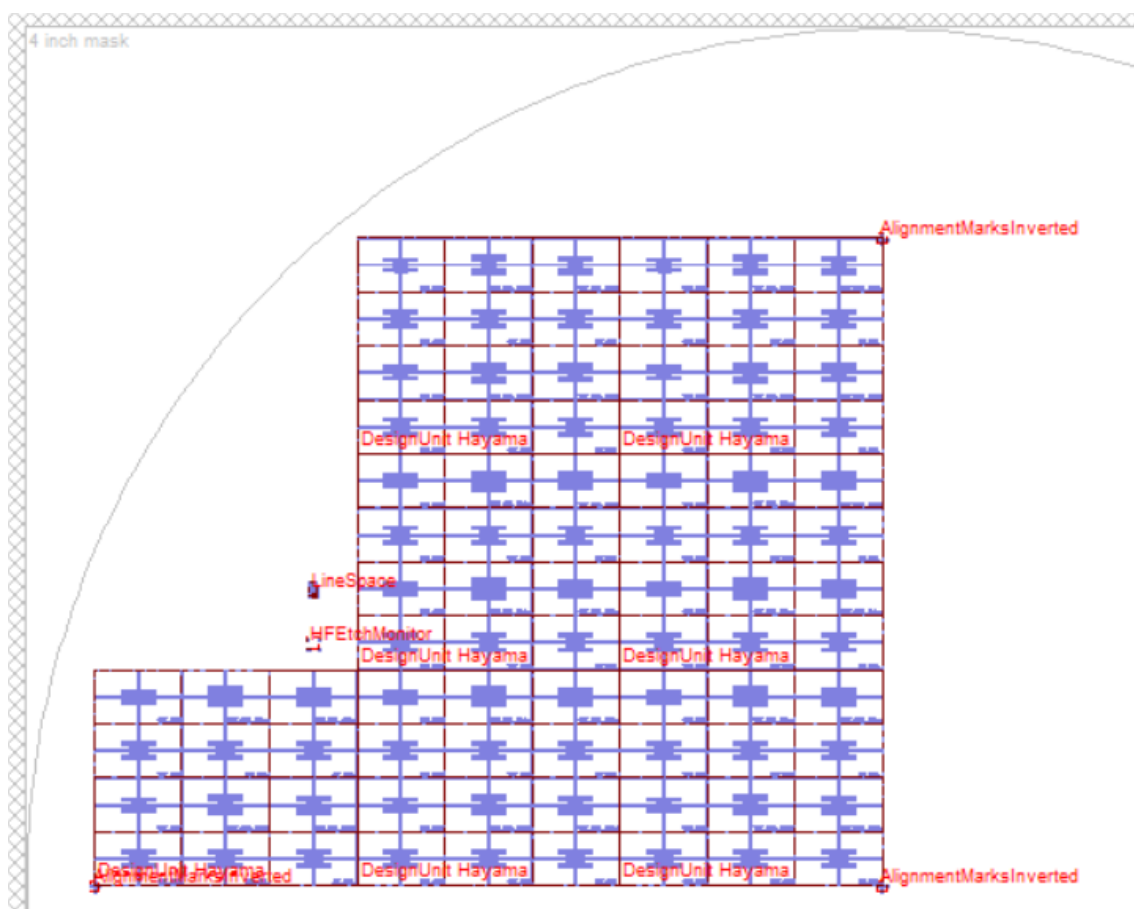
図 4.3: SOI ウエハを用いた熱アクチュエータの数値シミュレーション結果

このシミュレーションでは、デバイスが XY 平面上で回転し、垂直方向の変位を効果的に発揮できない問題が見られたため、図 4.4 に示すようにデバイスの Si サスペンション部分とメンブレンとの接合の仕方に、10 度と 30 度の角度をつけたデバイスも製作した。

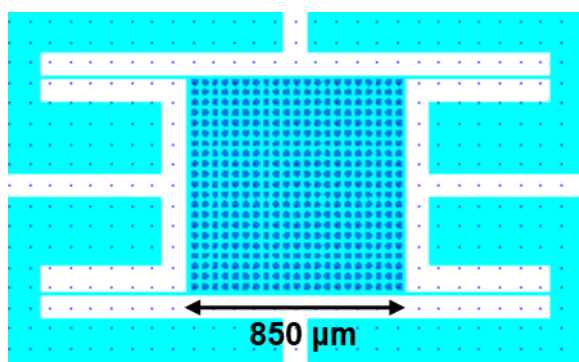
SOI ウエハを用いた熱アクチュエータは下記の手順で製作した。

1. SOI 基板の不純物除去のため、110 °C の SPM 洗浄を約 15 分間、フッ化水素酸溶液 (Hydrofluoric acid, HF) を用いた洗浄を 30 秒間行った。
2. スピンコーターを用いて試料上にフォトレジスト (S1818G) を 3000 rpm $\times$ 30 s で均一に塗布した。ホットプレートを用いて 110 °C で 10 分間、試料のベーキングを行った。マスクレス露光機を用いて dose 量 660 (ツーリングファクタ) , defocus 条件 $\pm$ 0 で金属パターンを露光後、NMD-3 を用いて 1 分間現像した。その後純水で 3 分間洗浄し、N<sub>2</sub> ガスを用いて試料を乾燥した。
3. スパッタ装置を用いて Cr/Au を成膜し、超音波洗浄機を用いて、アセトン (CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>) を 100 % の設定で 10 分 30 秒間、50 % の設定で 5 分間と 3 分間手動攪拌でビーカーを攪拌した後、エタノール (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) を 50% の設定で 2 分間リフトオフした。その後、N<sub>2</sub> ガスを用いて試料を乾燥した。
4. プロセス 8 で行う DRIE (Deep Reactive Ion Etching) のための保護膜としてデバイスの上面に Al を 200 nm 蒸着した。

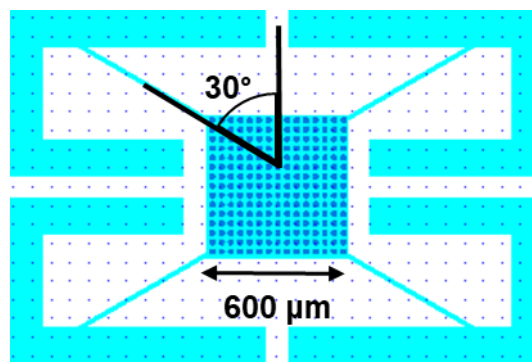
5. スピンコーターを用いてウエハにフォトレジスト (S1818G) を 3000 rpm×30 s で均一に塗布し、ホットプレートを用いて 110 °C で 10 分間、試料のベーキングをウエハの両面にそれぞれ行った。マスクレス露光機を用いて dose 量 660 (ツーリングファクタ) , defocus 条件±0 で上面に Si パターンを露光後、現像液 NMD-3 を用いて 1 分間現像した。その後純水で 3 分間洗浄し、N<sub>2</sub> ガスを用いて試料を乾燥した。
6. Al etchant 液に約 5 分間浸し、DRIE で掘る部分上の Al を取り除き、その後純水で 5 分洗浄した。
7. DRIE を用いて、O<sub>2</sub> ashing をガス圧力: 20 Pa, プラズマ電力: 50W, ガス流量: 100 sccm の条件下で 1 分 30 秒間行った。
8. SiO<sub>2</sub> を選択エッチング停止層として使用し、DRIE で上面を 10 μm, エッチングを行った。
9. 最後に不純物除去のため、SPM 洗浄を 10 分間行い、HF エッチングを約 5 分間行ったのち、純水で洗浄、N<sub>2</sub> ガスで乾燥した。



(a)



(b)

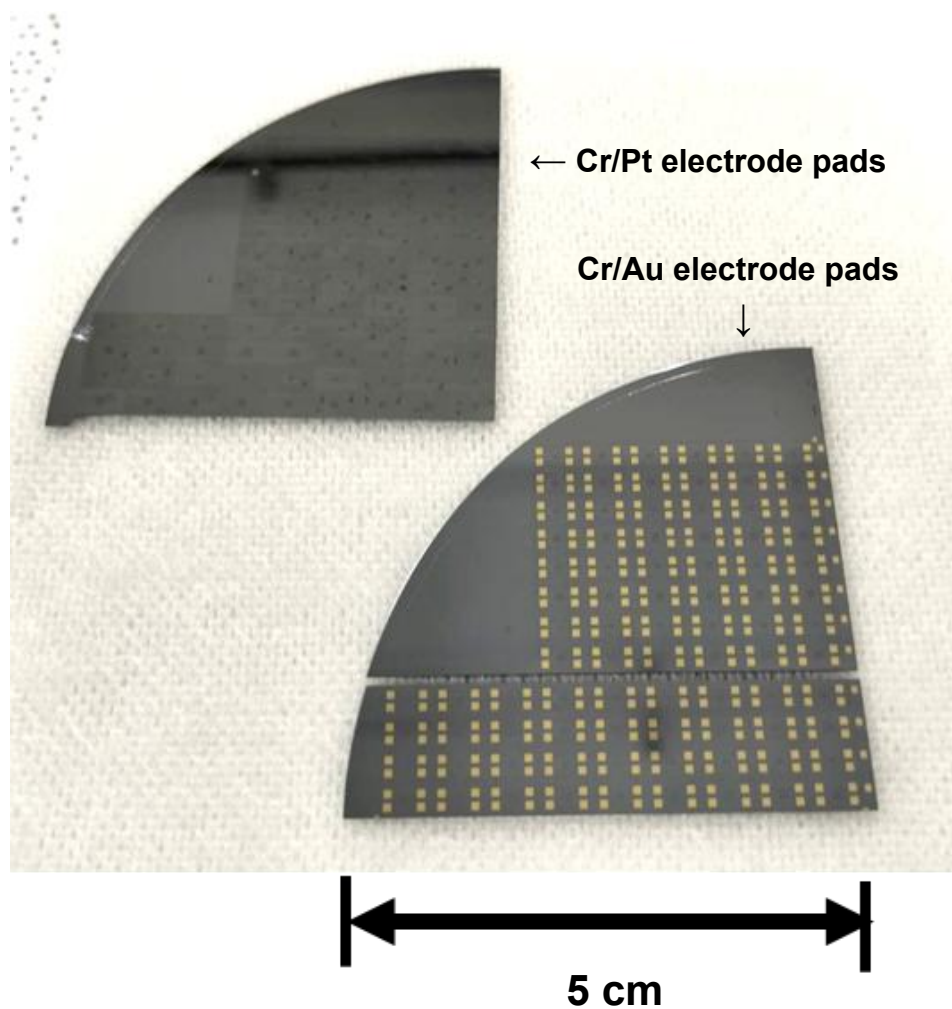


(c)

図 4.4: SOI ウエハを用いた熱アクチュエータの製作マスクデザイン  
(a) ウエハ全体 (b, c) デバイスデザインの例

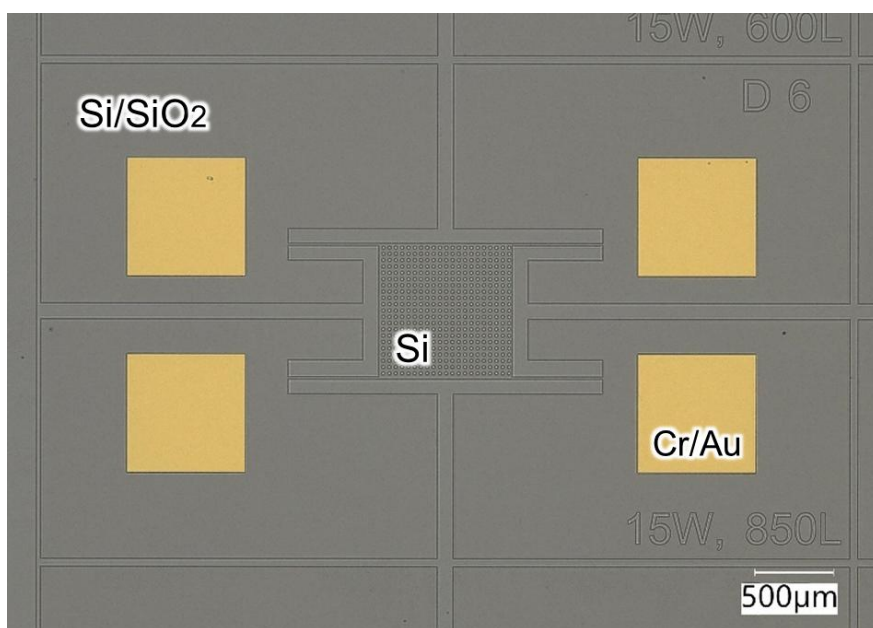
## 4.2 SOI 熱アクチュエータの試作結果

製作したデバイスを図 4.5 に、SEM 画像を図 4.6 に示す．今回のプロセスでは、同一形状のアクチュエータを同一膜厚の SOI 基板 2 枚にプロセスを行った．このうち片方は Cr/Pt, 他方は Cr/Au の電極パッドを Si の上に積層し比較検討を試みたが、結果として Cr/Pt の電極パッドは、プロセス 9 の SPM 洗浄を行った段階で剥がれてしまった．そのため実験には Cr/Au の電極パッドが積層された SOI ウエハのみを使用した．

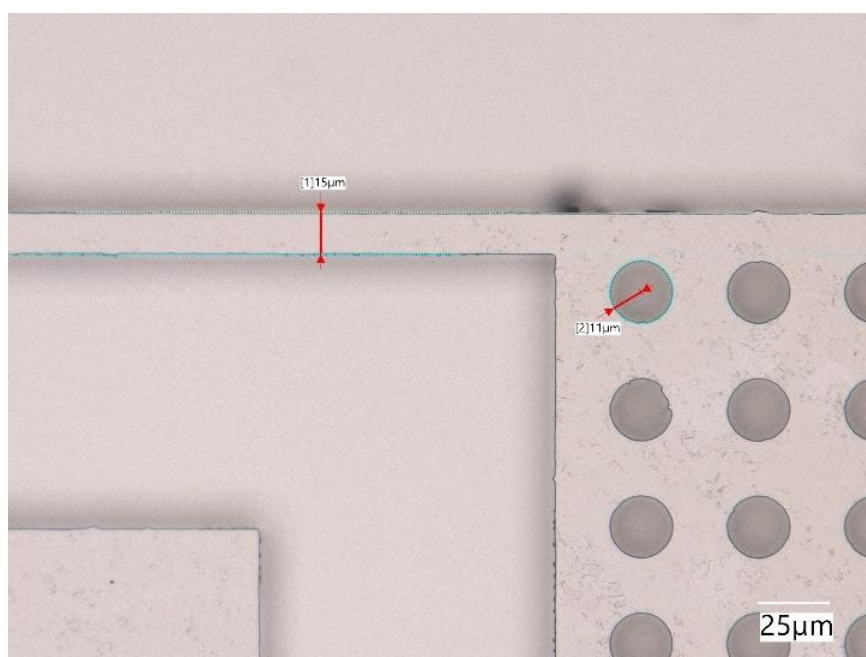


(a)



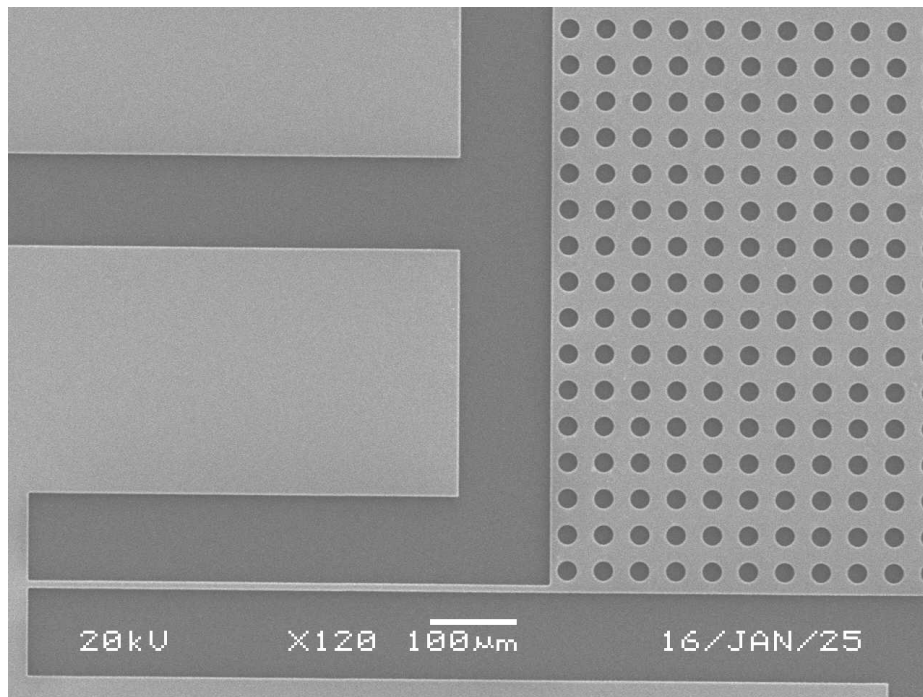


(b)

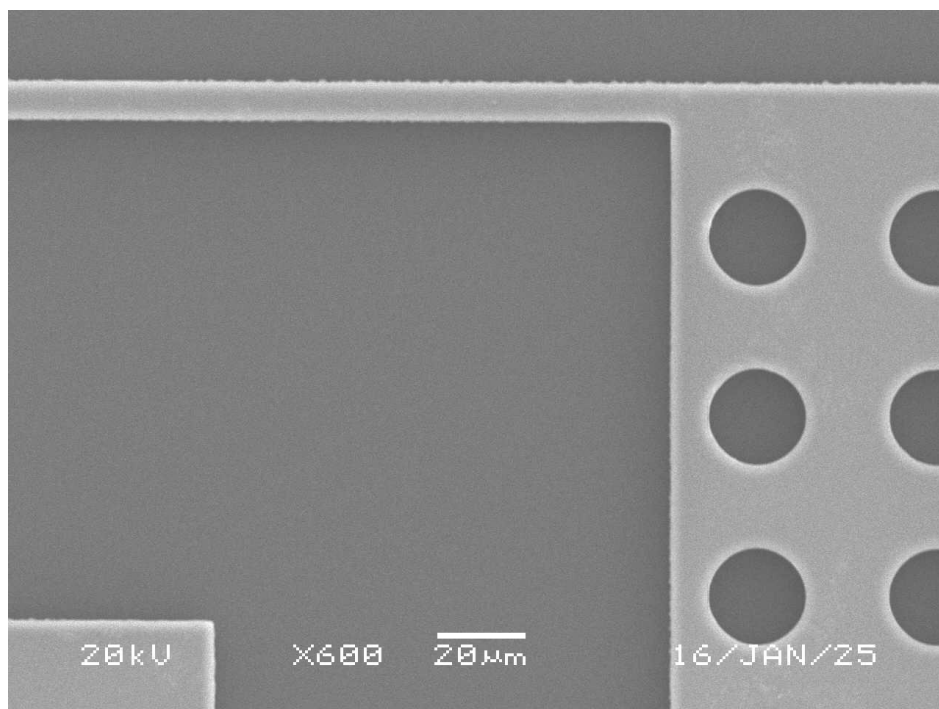


(c)

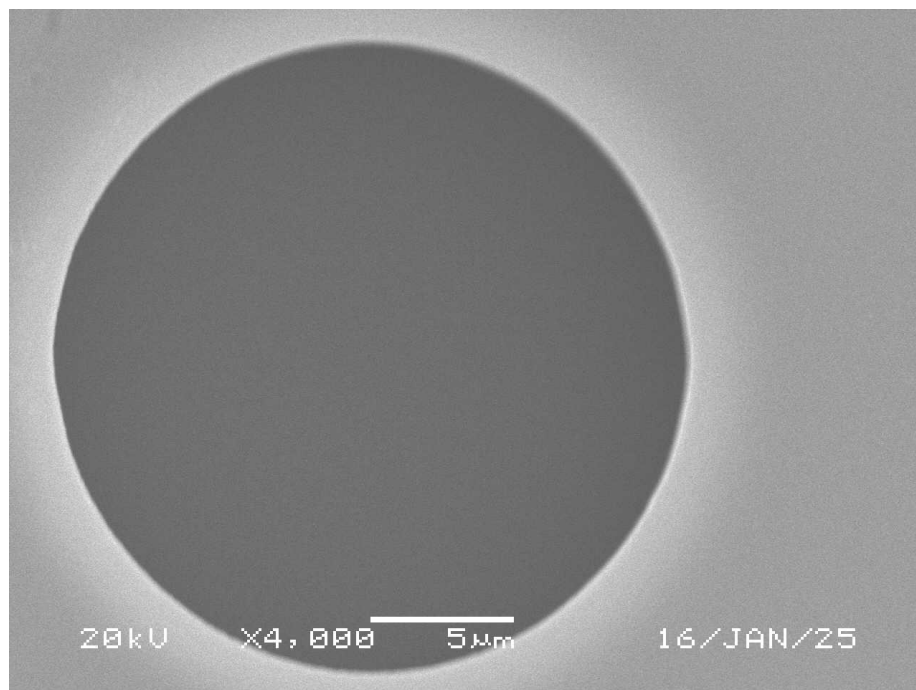
図 4.5: 製作した SOI ウエハを用いた熱アクチュエータの画像 (a) 電極パッドが Cr/Pt のウエハ (左上), 電極パッドが Cr/Au のウエハ (右下) (b-c) デバイス画像



(a)



(b)



(c)

図 4.6: デバイスの SEM 画像 (a) 全体像 (b) サスペンション部分の拡大写真  
(c) リリースホールの詳細写真

## 4.3 LDV を用いた測定・評価

### 4.3.1 変位測定

本実験の目的は、絶縁膜上の Si 層に印加する電圧の振幅に対する可動部分の変位がどのように変化するかを調べることである。実験セットアップは第 3 章 2 節と同様にして、AC 電圧を印加してデバイスを通電加熱した。

図 4.7 は、電圧を印加すると熱アクチュエータが上下に振動することを示している。先述のシミュレーション結果を参照して、周波数 1 Hz で任意波発生器を用いて 10 V<sub>pp</sub> の AC 電圧をかけた。今回のデバイスも、電圧を印加するとデバイスは垂直下向きに動くことがわかった。

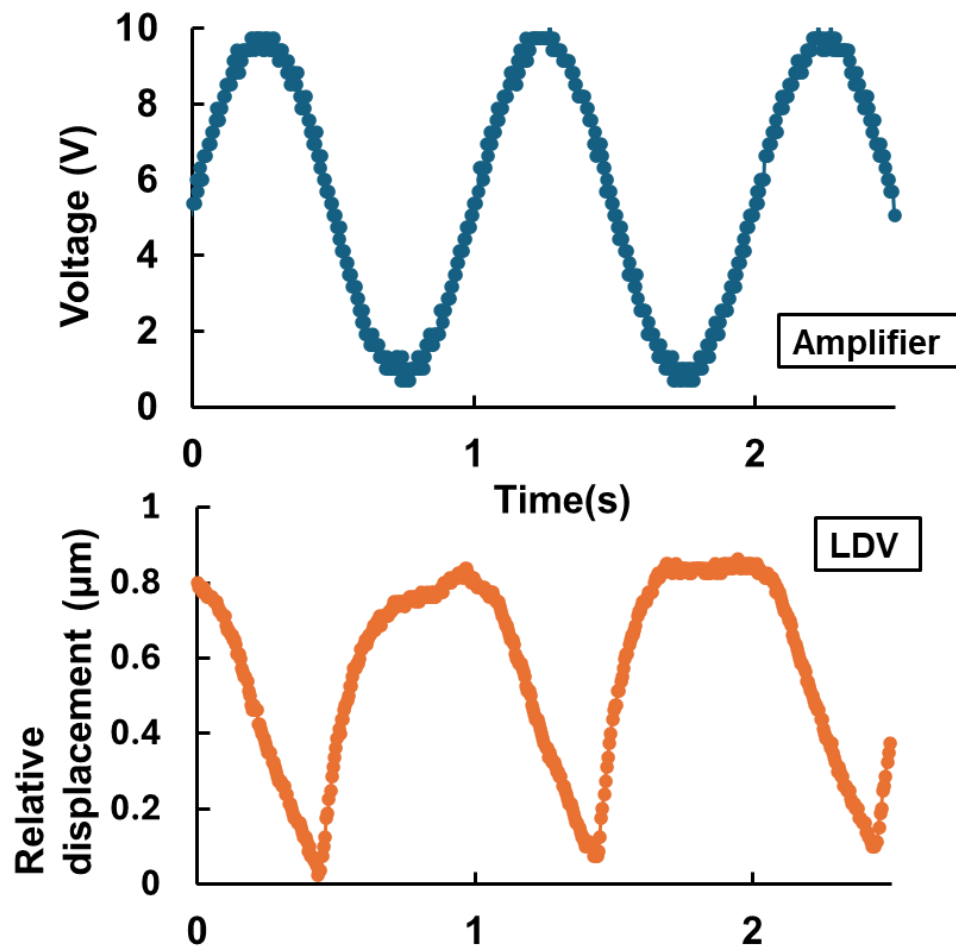


図 4.7: MEMS 印加電圧（上）とレーザドップラー振動計で測定した MEMS 変位（下）

### 4.3.2 周波数応答

1 辺が 600  $\mu\text{m}$  サイズのメンブレンを、5  $\mu\text{m}$  幅の細い Si が角度をつけずにつなぐデバイスに、10 V<sub>pp</sub> を印加したときの上下動の周波数特性を図 4.8 に示す。

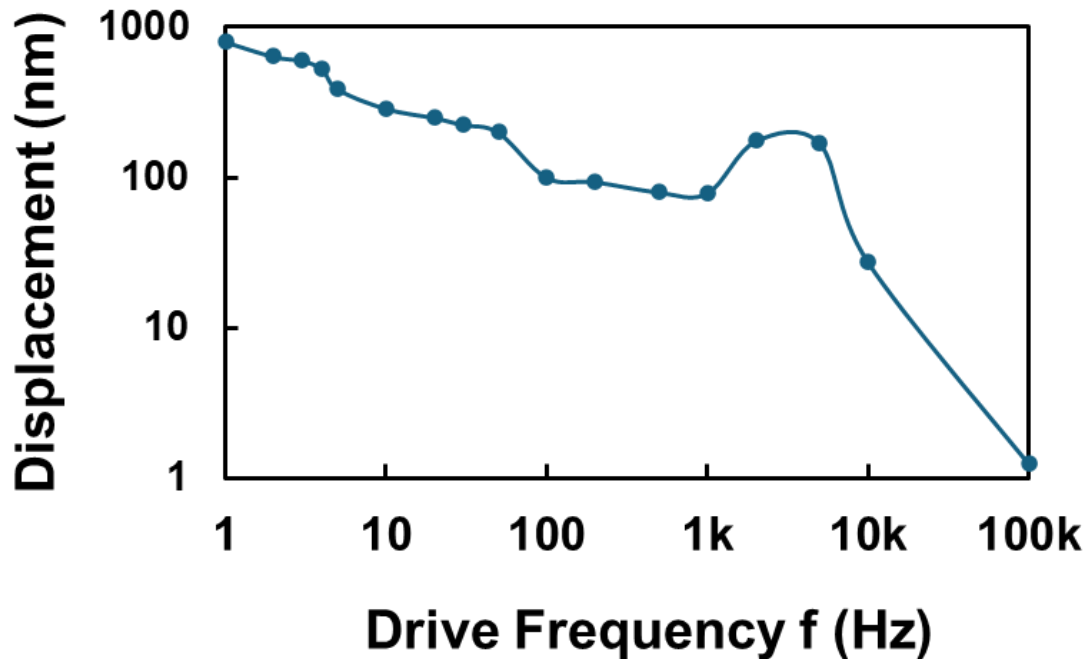


図 4.8: MEMS 周波数応答. デバイスは 10 V (peak-to-peak) AC 電圧で駆動  
駆動周波数と変位は対数グラフ化されていることに注意

## 4.4 考察

図 4.6 に示したデバイスの SEM 画像に示すように、メンブレンにつながる細い 5  $\mu\text{m}$ -15  $\mu\text{m}$  の Si サスペンションは、ほとんど幅が変化せずに製作できている。また、LDV の結果が示すように、熱アクチュエータは印加電圧と同じ周波数で上下動しており、10 V<sub>pp</sub> の駆動信号で変位が 0.8  $\mu\text{m}$  だと判明した。図 4.2 に示したように、Si メンブレン直下のフッ酸で除去した SiO<sub>2</sub> 層は 4  $\mu\text{m}$  であるため、変位は SiO<sub>2</sub> 層の厚み以内に収まっていることもわかる。

図 3.12 と図 4.8 の周波数応答プロットを比較すると、SiO<sub>2</sub> 膜を用いた熱アクチュエータより SOI ウエハを用いた熱アクチュエータの方が、共振周波数が高くなっていると考えられる。小型原子時計応用の波長可変光源の目的のひとつが、DC から数 Hz の周波数範囲にある機械的振動や温度変化などの外乱による波長ドリフトを補正することであることを考

慮すると、共振周波数が 1 kHz-10 kHz の範囲にあることで、外乱に対するロバスト性が高くなると考えられる。また 10 kHz を超える範囲では高周波信号を除去できており、最大変位は 1 Hz で発生、周波数が高くなるほど変位が減少する傾向があることがわかる。

SiO<sub>2</sub> 膜を用いた熱アクチュエータと比較して、熱アクチュエータの変位の大きさは約 2/3 に縮小したが、これは Si メンブレンの方が SiO<sub>2</sub> メンブレンよりも機械的剛性が高いためだと考えられる。LDV の測定では SOI ウエハを用いた熱アクチュエータの方が安定した動きが観測された。これは Si メンブレンの方が SiO<sub>2</sub> メンブレンよりも反射率が高く、膜面のたわみも少ないことが理由だと考えられる。

## 4.5 第 4 章の結論

第 4 章では、SOI ウエハを用いて、上面の Si 層の熱膨張による座屈で上下動する熱アクチュエータを設計し、製作に成功した。第 3 章と比較すると Si 層によるしわのないメンブレンが利点だと言える。熱アクチュエータに AC 電圧を印加すると、駆動周波数と同じ周波数で変位 0.8  $\mu\text{m}$  の安定した上下動が観測された。本研究の目的である、チップサイズが 3.2 mm  $\times$  5.2 mm 以内で、MEMS ミラーの変位が 10 nm 以上、DC-10 Hz の周波数範囲で動作し、高周波ノイズ除去を備えた熱アクチュエータの製作は達成された。

## 第5章

# 結論

### 5.1 各章のまとめ

各章の結論を再掲する。

第2章では、まず熱アクチュエータの主な種類を記述したのち、バイモルフと座屈の2つの機構を利用した熱アクチュエータの原理について述べた。熱アクチュエータは静電駆動型 MEMS に比べて、動作周波数範囲が小型原子時計応用により適しているという利点がある。また熱アクチュエータの方が静電駆動型 MEMS よりも機械的外乱に対するロバスト性が高い点と、理論値計算から応力が大きい可能性が示され、第1章で述べた光圧によるレーザの波長ゆらぎの課題を解決しうる。

第3章では、波長可変光源としての MEMS-VCSEL における現在の課題に対して有効だと考えられた、 $\text{SiO}_2$  の熱膨張により垂直に動く座屈タイプの熱アクチュエータを設計し、シミュレーションを行った。また、実際に印加電圧の駆動周波数と同じ周波数で上下に振動する  $\text{SiO}_2$  薄膜を備えた熱アクチュエータの製作に成功した。デバイスの周波数応答を見ることで、確かに熱アクチュエータが高周波信号を効果的に除去することが示された。TCR 測定で同デバイスの抵抗温度係数が求められ、デバイスの抵抗の変化を介して温度を監視し、駆動信号電力を制御することで、MEMS デバイスの動作変位を調整可能であることがわかった。

第4章では、SOI ウエハを用いて、上面の Si 層の熱膨張による座屈で上下動する熱アクチュエータを設計し、製作に成功した。第3章と比較すると Si 層によるしわのないメンブレンが利点だと言える。熱アクチュエータに AC 電圧を印加すると、駆動周波数と同じ周波数で変位  $0.8 \mu\text{m}$  の安定した上下動が観測された。本研究の目的である、チップサイズが  $3.2 \text{ mm} \times 5.2 \text{ mm}$  以内で、MEMS ミラーの変位が  $10 \text{ nm}$  以上、DC-10 Hz の周波数範囲で動かし、高周波ノイズ除去を備えた熱アクチュエータの製作は達成された。

## 5.2 本研究の結論

高精度な時刻同期には小型原子時計 (Chip Scale Atomic Clock, CSAC) が重要であり、さらなる小型化には安定した波長可変レーザ光源が必要である。

これまで、小型原子時計応用の波長可変光源としての MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) -VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) の現状の課題を特定し、さまざまな原理で安定性を向上しうる 2 種類の熱アクチュエータの設計および製造に成功し、その動作を確認した。

酸化シリコン ( $\text{SiO}_2$ ) 膜を用いた熱アクチュエータと SOI (silicon on insulator) ウエハを用いた熱アクチュエータは、確かに低駆動周波数では大きな変位を示し、高駆動周波数では小さな変位を示した。これは高周波ノイズ源に対する感受性を低減するという設計目標と一致した。

$\text{SiO}_2$  膜を用いた熱アクチュエータでは、実際の小型原子時計用途の使用時に想定される周波数に合わせた抵抗温度係数を計測した。MEMS デバイスの温度と入力電力を直接相関させ、抵抗の変化を介して温度を監視して駆動信号電力を制御することで、MEMS デバイスの動作変位を調整できる可能性を示した。

2 種類ともチップサイズが  $3.2 \text{ mm} \times 5.2 \text{ mm}$  以内、MEMS ミラーの変位が  $10 \text{ nm}$  以上、DC-10 Hz の周波数範囲で動作する熱アクチュエータであるという点で、本研究の目的は達成された。

## 5.3 今後の検討課題

今後、MEMS 可動部分に外部委託で HR (High Reflectance) コーティングを施したのち、熱アクチュエータを VCSEL チップと組み合わせると、周波数安定性の議論につながる。光干渉計を使用し、MEMS を低周波数で動作させたときの光圧に対する耐性を確認できる。レーザ出力のオン/オフの両方で MEMS の動きを比較することで、光圧現象の大きさを確認することができ、MEMS の動作安定性に影響を与える光圧以外の要因も調査できる。

構造設計の観点では、第 3 章で電極を配置する絶縁膜として本研究では  $\text{SiO}_2$  を使用したが、より剛性が高いとされる窒化シリコン ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) 膜などの他の材料や、よりたわみの少ない  $\text{SiO}_2$  膜を用いたデバイスの製作可能性がある。電極の厚みや幅、デザインについても最適化の余地がある。



# 本研究に関する発表文献

## 国内学会発表

1. Yuri Hayama, Vivek A. Menon, and Hiroshi Toshiyoshi, “Thermal actuator for wavelength stability in tunable MEMS-VCSELs as a chip-scale atomic clock laser source,” 電気学会 センサ・マイクロマシン部門, 第 41 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2024 年 11 月 25 日~27 日, 仙台国際センター.

## 学術論文

1. Yuri Hayama, Vivek A. Menon, Laurent Jalabert, and Hiroshi Toshiyoshi, “Thermal Actuator for Wavelength Stability in Tunable MEMS-VCSELs as a Chip-Scale Atomic Clock Laser Source,” IEEJ Transactions on E. (投稿 2024 年 12 月 23 日, 査読中)

## 参考文献

- [1] McGrew, W.F. *et al.*, “Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level,” *Nature* **564**, 87–90 (2018)
- [2] Svenja Knappe *et al.*, “A microfabricated atomic clock,” *Appl. Phys. Lett.* **85**(9), 1460–1462 (2004).
- [3] H. Zhang *et al.*, “ULPAC: A Miniaturized Ultralow-Power Atomic Clock,” in *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **54**(11), 3135–3148 (2019)
- [4] W. Markowitz *et al.*, “Frequency of Cesium in Terms of Ephemeris Time,” *Phys. Rev. Lett.* **1**(3), 105–107 (1958)
- [5] N. Hinkley *et al.*, “An Atomic Clock with 10–18 Instability,” *Science*, **341**, 1215–1218 (2013)
- [6] 国立研究開発法人産業技術総合研究所 計量標準総合センター, “時間：秒（s）,” Retrieved December 29, 2024, from [https://unit.aist.go.jp/nmij/library/mise\\_en\\_pratique/time/](https://unit.aist.go.jp/nmij/library/mise_en_pratique/time/)
- [7] 国立研究開発法人産業技術総合研究所, “2000 万年に 1 秒と狂わない高精度原子時計を開発－世界最高水準の原子時計で標準時の進み方を監視－,” Retrieved January 15, 2025, from [https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2003/pr20030609/pr20030609.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2003/pr20030609/pr20030609.html)
- [8] S. Knappe, P.D.D. Schwindt, V. Shah, L. Hollberg, J. Kitching, L. Liew, and J. Moreland, “A chip-scale atomic clock based on  $^{87}\text{Rb}$  with improved frequency stability,” *Opt. Express* **13**(4), 1249–1253 (2005)
- [9] 総務省, “アメリカ合衆国（United States of America）通信,” Retrieved December 29, 2024, from <https://www.soumu.go.jp/g-ict/country/america/pdf/001.pdf>
- [10] 文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター, “アメリカにおける研究開発動向－公開情報スキニングからの抽出－,” Retrieved December 29, 2024, from [https://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-NN17\\_FullJ.pdf](https://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-NN17_FullJ.pdf)
- [11] D. W. Allan, “Statistics of atomic frequency standards,” in *Proceedings of the IEEE*, **54**(2), 221–230 (1966)
- [12] Microsemi, “SA.45s Space CSAC,” Retrieved September 12, 2024, from [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_view/1243238-space-csac-datasheet](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/1243238-space-csac-datasheet)
- [13] 池上 健, “CPT を利用した小型原子時計開発の世界的動向,” *マイクロメカトロニクス* **52**(199), 77–91 (2008)
- [14] 五箇 繁善, “チップスケール原子時計の最新の展望－正確な時計により広がるアプリケ

- ーション,” 電気学会誌 **135**(10), 701-704 (2015)
- [15] 福田 京也, “CPT を用いた超小型周波数標準,” レーザ研究 **35**(4), 222-227 (2007)
- [16] E. Arimondo, “Coherent population trapping in laser spectroscopy,” Progress in Optics XXXV, E. Wolf, eds. **35**, 257-354 (1996)
- [17] 原 基揚, 矢野 雄一郎, 梶田 雅稔, 井戸 哲也, “原子時計のチップ化に向けた超小型集積部品の開発,” 情報通信研究機構研究報告 **65**(2), 219-224 (2019)
- [18] C. Affolderbach, A. Nagel, S. Knappe, C. Jung, D. Wiedenmann, and R. Wynands, “Nonlinear spectroscopy with a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL),” Appl. Phys. B **70**, 407-413 (2000)
- [19] J.F. DeNatale, R.L. Borwick, C. Tsai, P.A. Stupar, Y. Lin, R.A. Newgard, R.W. Berquist, and M. Zhu, “Compact, low-power chip-scale atomic clock,” Appl. Phys. B **70**, 407-413 (2000)
- [20] Martin Grabherr, Dieter Wiedenmann, Roland Jäger, and Roger King, “Fabrication and performance of tuneable single-mode VCSELs emitting in the 750- to 1000-nm range,” Proc. SPIE **5737**, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers IX (2005)
- [21] Darwin K. Serkland, Gregory M. Peake, Kent M. Geib, Robert Lutwak, R. Michael Garvey, Mathew Varghese, and Mark Mescher, “VCSELs for atomic clocks”, Proc. SPIE **6132**, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers X, 613208 (2006)
- [22] Hitoshi Nishino, M. Hara, Y. Yano, M. Toda, Y. Kanamori, M. Kajita, T. Ido, T. Ono, “A reflection-type vapor cell using anisotropic etching of silicon for micro atomic clocks,” *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 67-70 (2008)
- [23] Vivek A. Menon, Yi Xiao, Mohammed S. Khan, Keiji Isamoto, Nobuhiko Nishiyama, Hiroshi Toshiyoshi, “Actuator/Reflector Decoupling for Reduced Excitation of Secondary Mechanical Resonance Modes in MEMS-Tunable VCSELs,” IEEE MEMS, 1075 - 1078 (2024)
- [24] K. E. Petersen, “Silicon as a Mechanical Material,” Proceedings of the IEEE, **70**(5), (1982)
- [25] Kenichi Iga, “Surface-Emitting Laser—Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field,” IEEE JOURNAL ON SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, **6**(6), (2000)
- [26] N. Nishiyama, M. Arai, S. Shinada, K. Suzuki, F. Koyama, and K. Iga, "Multi-oxide layer structure for single-mode operation in vertical-cavity surface-emitting lasers," in IEEE Photonics Technology Letters, **12**(6), 606-608 (2000)
- [27] Kenichi Iga, “Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: Its Conception and Evolution,” Jpn. J. Appl. Phys. **47** 1 (2008)
- [28] K. Takada *et al.*, “New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique,” Appl. Opt. **26**(9), 1603–1606 (1987)
- [29] 丹野直弘・市村 勉・佐伯昭雄, 「光波反射像測定装置」, 日本国特許第 2010042 号, (1990)
- [30] D. Huang *et al.*, “Optical coherence tomography,” Science **254**(5035), 1178–1181 (1991)

- [31] James Fujimoto and Eric Swanson, “The Development, Commercialization, and Impact of Optical Coherence Tomography,” *Invest Ophthalmol Vis Sci.* **57**(9), (2016)
- [32] Connie J. Chang-Hasnain, “Tunable VCSEL,” *IEEE JOURNAL ON SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS* **6**(6) (2000)
- [33] Benjamin Potsaid *et al.*, "MEMS tunable VCSEL light source for ultrahigh speed 60kHz - 1MHz axial scan rate and long range centimeter class OCT imaging", *Proc. SPIE 8213, Optical Coherence Tomography and Coherence Domain Optical Methods in Biomedicine XVI*, 82130M (2012).
- [34] Demis D. John *et al.*, “Wideband Electrically Pumped 1050-nm MEMS-Tunable VCSEL for Ophthalmic Imaging,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY* **33**(16), (2015)
- [35] Mohammed S. Khan *et al.*, “MEMS-VCSEL as a tunable light source for OCT imaging of long working distance,” *Journal of Optical Microsystems* **1**(3), 034503 (2021)
- [36] Yuri Hayama, Vivek A. Menon, Laurent Jalabert, and Hiroshi Toshiyoshi, “Thermal Actuator for Wavelength Stability in Tunable MEMS-VCSELs as a Chip-Scale Atomic Clock Laser Source,” *IEEJ Transactions on E.* (「第 41 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム」同時投稿論文, 査読中)
- [37] Santec Holdings Corporation, “微小で高性能な次世代光源, Tunable VCSEL,” Retrieved January 14, 2025, from <https://www.santec.com/jp/about/coretechnology/tunablevcsel/>
- [38] 岡村秀樹, “光学工房-宇宙への光の動力利用の可能性,” *応用物理学会* **38**(7), 376-377 (2009)
- [39] R. S. Tucker, D. M. Baney, W. V. Sorin, and C. A. Flory, "Thermal noise and radiation pressure in MEMS Fabry-Perot tunable filters and lasers," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **8**(1), pp. 88-97 (2002)
- [40] K. Ogando, N. La Forgia, J.J. Zárate, and H. Pastoriza, “Design and characterization of a fully compliant out-of-plane thermal actuator,” *Sensors and Actuators A: Physical* **183**, 95-100 (2012)
- [41] Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), “今いる場所・時間がわかる測位とは,” Retrieved January 15, 2025, from [https://www.jaxa.jp/countdown/fl18/overview/gps\\_j.html](https://www.jaxa.jp/countdown/fl18/overview/gps_j.html)
- [42] 日本取引所グループ, “現物取引 システム概要 arrowhead,” Retrieved January 21, 2025, from <https://www.jpx.co.jp/systems/equities-trading/01.html>
- [43] Lombardi MA, Novick AN, Neville-Neil G, and Cooke B, “Accurate, Traceable, and Verifiable Time Synchronization for World Financial Markets,” *J Res Natl Inst Stand Technol.* **121** 436-463 (2016)
- [44] 小塚 莊一郎, 藤野 将生, 北 永久, “測位衛星システム (GNSS) から提供される情報の過誤と民事責任,” *情報法制研究* **2**, 3-14 (2017)
- [45] 国土交通省, “ITS (高度道路交通システム) ,” Retrieved January 21, 2025, from <https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01its/about.html>

- [46] Xiaoyu Kong, Yun Cao, Hengbo Zhu, He Wang, Junlin Lu, Xiaobin Xu, Weirong Nie, and Zhanwen Xi, “Experimental and numerical study of MEMS electrothermal actuators: Comparing dynamic behavior and heat transfer process in vacuum and non-vacuum environments,” *Vacuum* **227**, 113409 (2024)
- [47] Alissa Potekhina and Changhai Wang, “Review of Electrothermal Actuators and Applications,” *Actuators* **8**(4), 69 (2019)
- [48] Thomas Sciberras, Marija Demicoli, Ivan Grech, Bertram Mallia, Pierluigi Mollicone, and Nicholas Sammut, “Coupled Finite Element-Finite Volume Multi-Physics Analysis of MEMS Electrothermal Actuators,” *Micromachines* **13**(1) (2022)
- [49] Hoang, K.T., Nguyen, D.T., and Pham, P.H., “Impact of design parameters on working stability of the electrothermal V-shaped actuator,” *Microsystem Technologies* **26**, 1479–1487 (2020)
- [50] Ashudeep Minhas, Amit Kumar, Deepak Bansal, Khushbu Mehta, Anuroop Bajpai, Prem Kumar, and Kamaljit Rangra, “Fabrication of electro-thermally driven tunable plate with Au/SiO<sub>2</sub> bimorph beams,” *Microsystem Technologies* **25**, 2821–2829 (2019)
- [51] Seok-Won Kang, Joe Fragala, Su-Ho Kim, and Debjyoti Banerjee, “Design and Electro-Thermo-Mechanical Behavior Analysis of Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Bimorph Microcantilevers for Static Mode Sensing,” *Sensors* **17**(11), 2510 (2017)
- [52] S. Timoshenko, “Analysis of Bi-Metal Thermostats,” *J. Opt. Soc. Am.* **11**, 233-255 (1925)
- [53] 原 基揚, 品田 聡, “超小型原子時計のための高周波変調用発振器及び波長可変レーザーチップの開発,” 情報通信研究機構研究報告 **69**(2), 109-113 (2017)
- [54] 橋本 将明, 田口 良広, “ミリ長ストローク・低電力熱駆動切り紙 MEMS アクチュエータの開発—薄膜バイモルフの熱・機械応答特性—,” 熱物性 **34**(4), 109-116 (2020)
- [55] Kai Wu, Tjitte-Jelte Peters, Marcel Tichem, Ferry Postma, Albert Prak, Kerstin Wörhoff, and Arne Leinse, “Bimorph actuators in thick SiO<sub>2</sub> for photonic alignment,” *Proc. SPIE* **9753**, Optical Interconnects XVI, 975311 (2016)
- [56] 東京天文台編纂, 丸善, “理科年表 平成 19 年, p. 375, 397, 404
- [57] MEMS Clearinghouse®, “Material: Platinum (Pt), film,” Retrieved January 22, 2025, from <https://www.memsnet.org/material/platinumptfilm/>
- [58] Y. Wu, J. Ordonez-Miranda, L. Jalabert, S. Tachikawa, R. Anufriev, H. Fujita, S. Volz, M. Nomura, Observation of heat transport mediated by the propagation distance of surface phonon-polaritons over hundreds of micrometers, *Appl. Phys. Lett.* **121**, 112203 (2022)
- [59] Jose Ordonez-Miranda, Laurent Jalabert, Yunhui Wu, Sebastian Volz, and Masahiro Nomura, “Analytical integration of the heater and sensor  $3\omega$  signals of anisotropic bulk materials and thin films,” *J. Appl. Phys.* **133**, 205104 (2023)

# 謝辞

本研究は、東京大学生産技術研究所の年吉 洋教授の御指導のもと行いました。研究方針から実験内容、そして結果の解析に至るまで、豊富な知識と経験に基づいた貴重な御意見、御指導を賜りました。本研究所の所長にご就任され、ご多忙の中、研究に関する多くの学ぶ機会を設けていただきました。心より御礼申し上げます。

本研究室のティクシエ三田 アニエス准教授には、日頃の研究における取り組み方の御指導をいただいただけでなく、研究生生活に関するご相談にも快く応じていただき、大変お世話になりました。また数多くのインターンシップ生の方々との出会いにより、研究生生活はより一層貴重な経験となりました。心より御礼申し上げます。

本研究室特任研究員の Vivek Anand Menon 氏には、クリーンルーム内の実験装置の使用方法から、研究方針や考え方に関する貴重な御意見、御指導を賜り、研究に関するご相談に快く応じていただきました。心より御礼申し上げます。

本研究室技術職員の安宅 学氏と高橋 巧也氏には、実験装置やシステムに関するすべてのサポートをしていただきました。また、気軽にお話してくださったため、実験のミスを未然に防ぐことできたと考えています。心より御礼申し上げます。

本研究室秘書の小泉 弘子氏には、研究室に関する豊富な知識と経験により、質問を迅速、適切にご対応いただき、研究生生活を非常に円滑に進めることができました。また昼食をご一緒させていただくことも多く、日々の大きな楽しみでした。心より御礼申し上げます。

東京大学生産技術研究所野村研究室研究員の Laurent Jalabert 氏には、抵抗温度係数の計測からデータの解釈まで多くの御指導を賜りました。週1回、共通のスポーツである卓球でもご一緒させていただき、大きな息抜きとなりました。心より感謝申し上げます。また同研究室 OB の小池 壮太氏、小河原 陽平氏には、大学院の研究生生活に関するご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

本研究室の共同研究先である sante Holding 株式会社の諫本 圭史氏及び Tiara Nur Pratiwi 氏には、プロセスを共同で行い、ウェアの一部を使用させていただくなど、研究の様々な面で直接的にお世話になりました。またプライベートでも交流させていただき、研究生生活をより円滑に進めることができました。ここに深く感謝申し上げます。

九州工業大学の久米村 百子准教授及び神戸大学の本間 浩章准教授には、クリーンルーム共同使用の際、質問や相談に快く応じていただきました。また昼食をご一緒させていただくことで、研究生生活の大きな息抜きとなりました。ここに深く感謝申し上げます。

博士2回生の Sara Rodrigues Palma Guerreiro 氏には、短期間ではありましたが、研究生生活

と私生活の両面でお話をさせていただきました。心より感謝いたします。博士 2 回生の胡星卓氏には、研究や授業をはじめとする日々の生活において大変お世話になりました。ここに深く感謝申し上げます。

本研究室同期の菅原 淳平氏、小路 武史氏とは、お互いに相談しながら研究を進め、時に不安な気持ちを解消していただき、心強く研究生活を進めることができました、ここに深く感謝申し上げます。

本研究室 OB の Gabriel Faure 氏、近松 広輔氏には、学生生活に関するお話から、他研究室の学生との交流機会まで設けていただきました。ここに深く感謝申し上げます。

最後に、研究生活には家族の多大なる支えと励ましがあつたことをここに記し、深く感謝の意を表します。

本研究は総務省の中長期的電波利用展望研究事業（補助金番号 0155-0189）の支援を受けて実施されました。

令和 7 年 2 月  
羽山 由梨