

# Integrated Micro-machined Varifocal Mirror and Its Application to a Confocal Displacement Sensor

著者	NAKAZAWA KENTA
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	甲第18061号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00125179">http://hdl.handle.net/10097/00125179</a>

氏名	なかざわ けんた 中澤 謙太
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) ナノメカニクス専攻
学位論文題目	Integrated Micro-machined Varifocal Mirror and Its Application to a Confocal Displacement Sensor
論文審査委員	主査 東北大学教授 羽根 一博 東北大学教授 高 偉 東北大学教授 田中 秀治 東北大学准教授 金森 義明

## 論文内容要約

焦点可変ミラーは光学システムにおいて焦点距離変調器として用いられることが期待されている。マイクロマシニング技術を用いて焦点可変ミラーを製作することで様々な優位性, 例えば高速駆動, 低消費電力, 集積化等を付与することができる。特に集積化はマイクロマシニングを用いることで達成することができる。焦点可変ミラーの場合, 平面スキャニング機能の集積化は共焦点顕微鏡等のレーザー応用機器において非常に有用である。焦点可変ミラーと平面スキャニング機能を集積することで, 三次元にレーザースポットを走査することができる。スキャニング機能の他にも, 焦点可変ミラーをモニタリングするセンサの集積も機器への応用を見据えた場合に有用である。マイクロマシニングにおいては不純物拡散により製作することができる piezo 抵抗型のひずみセンサがよく研究されており, 焦点可変ミラーとの集積化に適している。また, レーザー機器は高分解能を達成するために収差を小さくする必要がある。共焦点顕微鏡等ではスポットを連続的に軸方向に走査することが求められるため, 焦点可変ミラーを動的に駆動する必要がある。静的に駆動する場合は, 荷重分布を適切に設定することで低収差が実現可能であるが, 動的に駆動する場合の低収差化の方法は詳しく研究されていない。そこで本研究では, 低収差振動型焦点可変ミラー, 焦点可変ミラーに piezo 抵抗型の焦点距離センサとスキャナの集積することを提案する。

共焦点変位センサは電子機器等の変形や高さ等を計測するために用いられ, 製品の質を補償するうえで非常に重要な計測機器である。共焦点変位センサにおいてスポットを走査する機構はキーとなる要素である。先行研究では, 光源に白色光と単色光を用いるものが提案されている。白色光を用いる場合, 計測点において軸方向に波長分布を用意し, 焦点位置にある波長を計測することで変位を求めることができる。一方, 光源に単色光を用いる場合はスポットを機械的に走査する必要がある。共焦点レーザー変位センサにおいて, レーザースポット走査機構が測定速度に対応するため, キーとなる要素である。先行研究では, 振動子を用いて軸方向にレンズを移動させる機構や焦点可変レンズ等を用いる機構が提案されている。それらの機構では測定速度と測定範囲に関して設計限界がある。そこで, マイクロマシニングによる焦点可変ミラーを用いることで共焦点レーザー変位センサの測定速度を向上させることを提案し, 実証する。

第1章では緒言として Microelectromechanical Systems (MEMS) や焦点可変デバイス, 共焦点変位センサ等の先

行研究と本研究の目的が述べられている。

第2章では共焦点レーザー変位センサへの応用を目的とした焦点可変ミラーの理論的考察が記述されている。本研究で用いられる焦点可変ミラーは静電駆動形である。変形ミラーと対向電極により構成され、対向電極は変形ミラーの直下に備えられている。また、焦点距離センサに用いるピエゾ抵抗型ひずみセンサの理論的考察が示されている。

第3章では共振型焦点可変ミラーの低収差化に関する研究が記述されている。焦点可変ミラーの収差はミラーの変形形状に関係している。広い焦点変調範囲を得るために焦点可変ミラーを共振振動させる。焦点可変ミラーを共振振動させるため、変形形状は振動モードによって決定される。ここでは、周辺の支持条件を改良することで、変形形状を理想である放物面に近づけることを試みた。理論モデルとして周囲が支持されている円板を考える。周辺支持条件として、固定支持と単純支持条件を比較したところ、単純支持の場合に放物面に近づくことが示された。3種類の周辺支持構造を有する焦点可変ミラーを設計し、製作を行なった。変形ミラーには Silicon-on-insulator (SOI) ウェハのデバイスシリコン層を用い、対向電極はガラスウェハ上に形成された溝に製作されている。SOI ウェハとガラスウェハは陽極接合により固定されている。Type A はミラーの全周が支持されており、固定支持条件を模したものである。Type B は周囲を8本の細い梁によって支持されており、Type C は16本の細い梁によって支持されており、それらは単純支持条件を模したものである。また、Type B と Type C は梁の全体的なバネ定数は同じである。Type A の共振振動時の最大変形の時の変形形状は放物面と 400 nm, Type B は 155 nm, Type C は 75 nm の差があった。Type C が最も収差が小さく、基準として用いられる He-Ne レーザーの波長の 8 分の 1 以下の精度で変形しており、低収差な共振型焦点可変ミラーを実現することができた。

第4章ではピエゾ抵抗型焦点距離センサと焦点可変ミラーとの集積に関して述べられている。ピエゾ抵抗型センサは不純物を拡散することでモノリシックに集積でき、MEMS 製作プロセスと親和性があるためよく用いられている。ピエゾ抵抗型センサはひずみに対応して電気抵抗値が変化する。また、焦点可変ミラーの焦点距離は変形ミラーの変形量によって決定される。そのため、焦点可変ミラーの変形量をピエゾ抵抗型センサにより計測することで、焦点距離を導出することができる。変形ミラーは n 型単結晶シリコンからなり、16本の細い梁に支持された円板である。ピエゾ抵抗型焦点距離センサは梁の固定端部分に製作した。ピエゾ抵抗型焦点距離センサはボロンイオンをイオン注入し、結晶構造を回復するためアニールをすることで製作した。共振振動駆動している焦点可変ミラーをドップラー振動計で計測し、その時のセンサからの出力信号を測定した。焦点可変ミラーの駆動に対応するセンサ信号が得られた。それらの関係はミラーが大変形していることが原因で非線形的であったが、補正が可能である。ピエゾ抵抗型センサにより焦点可変ミラーの焦点距離をモニタリングをすることが可能になり、制御系とあわせて用いることで安定的な駆動を可能にすることを示すことができた。

第5章ではウェハ接合を用いた焦点可変スキャナに関する研究が記述されている。焦点可変スキャナはスキャニングミラーと焦点可変ミラーが集積されたものである。先行研究では表面マイクロマシニングや SOI マイクロ

マシニングを製作方法に用いた焦点可変スキャナが提案された。それらの製作方法は構造の厚さ等の設計自由度が低いという問題点があるため、新規の製作方法を導入することが期待されていた。そこで、本研究では焦点可変スキャナの製作に接合法を用いて、様々な厚さの構造を比較的容易に得ることのできる単結晶シリコンを接合することで、設計の自由度を向上することを提案した。代表的な接合法としては、直接接合や陽極接合、金属拡散接合等がある。特に金の薄膜を用いる熱圧着法は金表面に酸化膜が形成されないなどの理由により、歩留まりが高く、電気抵抗も小さいという優位点がある。そのため、焦点可変スキャナの製作に金薄膜を用いた接合法を導入した。焦点可変スキャナは主に3層の単結晶シリコンから形成される。上層に焦点可変ミラー、中層にスキャナ、下層にスキャナの固定電極を形成した。焦点可変ミラーは直径が2 mmで、厚さが10  $\mu\text{m}$ であり、1軸の櫛歯駆動スキャナの反射面に形成されている。製作プロセスは以下のとおりである。2枚のSOIウエハを用い、一方のウエハのデバイスシリコン層にスキャナ、もう一方のウエハに焦点可変ミラーの構造を形成し、接合面となる金薄膜を形成する。それらのウエハをアライメントし、加熱し荷重を印加して接合する。最後にハンドルシリコン層をDeep reactive ion etching (RIE)により除去する。製作した焦点可変スキャナの焦点変調範囲、走査角度、変形ミラーのダイナミックデフォーメーション等を評価した。焦点可変範囲は300 Vを印加した場合、-523 mmから216 mmまで変化した。走査光学角度は振幅が50 Vの正弦波を共振周波数3.57 kHzで印加した場合、7°であった。スキャニングミラーでは回転方向の切り返し時に慣性力によって反射面が変形することが知られており、その変形がダイナミックデフォーメーションと呼ばれている。焦点可変スキャナの機械角度が-1.2°から+1.2°の間を共振周波数付近で走査した場合の変形ミラーのダイナミックデフォーメーションをパルスフィゾー干渉計を用いて評価した。この条件下ではダイナミックデフォーメーションは75 nmであった。最後にラインスキャンと焦点距離変調を同時に行なった。焦点可変スキャナの設計自由度の向上のために製作に接合法を導入し、製作と評価を行なった。光学システムの要求に幅広く適応する手法であるため有用である。

第6では焦点可変スキャナとピエゾ抵抗型焦点距離センサと角度センサの集積化に関して述べられている。4章で記述された通り、光学システムに組込む際には駆動状況をモニタリングする必要がある。そのため、5章で開発した焦点可変スキャナにピエゾ抵抗型センサを集積することが求められる。機械的な設計は5章のデバイスとほぼ同等である。焦点距離センサは焦点可変ミラーの支持梁の接続部に製作し、角度センサはスキャナのトーションバーの固定部に十字型のセンサを製作した。焦点距離センサからの信号は金薄膜を用いた接合によりスキャナ上の配線と電氣的接続を得た。製作プロセスは、先ずボロンイオンをイオン注入してピエゾ抵抗型センサを形成して、その後は5章のデバイスと同様に製作を行なった。角度センサ、焦点距離センサからの信号を取得し、角度センサからの信号は走査範囲内で1.7%の精度で計測することができた。

第7章ではマイクロマシニングによる焦点可変ミラーを用いた共焦点レーザー変位センサに関して述べられている。共焦点レーザー変位センサはレーザースポットを走査する必要があり、その走査機構が測定速度等に関係しているため重要な要素である。マイクロマシニングにより製作された焦点可変ミラーは高速で焦点距離を変調

することが可能で、共焦点レーザー変位計への応用に適している。焦点可変ミラーを共振周波数で駆動した時、1周期に同じ焦点距離が2回現れる。そのため、1周期に2つの信号が得られ、その信号間の時間と変位を関係により変位を導出する。光学ベンチ上に共焦点レーザー変位センサを製作し、評価を行なった。ワーキングディスタンスは31 mmで、7 kHzで焦点可変ミラーを駆動した時に310  $\mu\text{m}$ の測定範囲を得た。また、20  $\mu\text{m}$ 程度の段差の測定を行い、3  $\mu\text{m}$ 程度の精度で測定することができた。測定全範囲での線形誤差は-1.1%から1.2%であり、分解能は4.4  $\mu\text{m}$ であった。測定速度は焦点可変ミラーの駆動周波数で与えられ、従来の3.5倍の測定速度を実現した。

第8章では結言が記述されている。本研究では1章で述べられた問題を解決するため、新規の焦点可変ミラーや焦点可変スキャナを提案し、実現した。さらに、焦点可変ミラーを共焦点レーザー変位センサへ応用し、有用性を実証した。すなわち、これらの研究はレーザー計測装置等の発展に寄与すること考えることができる。