

博士論文（要約）

機能集約型SOI-MEMS設計手法と
その可変光学素子応用に関する研究

諫本 圭史

2016年6月8日提出

本論文は、著者が 2002 年から現在までで取り組んだ光 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の可変光学素子応用に関する研究を、MEMS の設計概念に主眼をおいてまとめたものである。

MEMS 技術を用いた光可変素子は、機械的変位を制御できることから、液晶や光磁気光学効果などと比較すると大きな光学的ダイナミックレンジを有する特長がある。現在では波長可変フィルタや波長可変光源などにも使用されており、製品応用も通信だけでなく、センシングや医療機器など幅広く用いられている。これらの MEMS 技術をベースとした光可変素子は、それぞれの分野で必要不可欠なデバイスであり、市場規模は小さいながらも重要な MEMS 技術の応用分野のひとつとなっている。しかしながら、これらの光可変素子のような、少量多品種に分類される応用では、MEMS 技術の導入が、社会的または産業的な進歩に貢献することが明らかであっても、技術的・資金的な制約から導入に踏み切れない場合も多くあった。MEMS の製造工程は、デバイスごとに固有の工程があるといわれる。デバイス開発期間の多くは、工程の最適条件を見つけるために費やされ、機能の実現検証までに数年の時間がかかることもある。開発初期段階で実現見通しを立てるまでに、必要以上の時間がかかることは、実用化を目指した開発では致命傷になることもあり、MEMS 導入の障害となっていた。

SOI-MEMS は、SOI (Silicon On Insulator) ウエハを材料として機械的・光学的信頼性の高いデバイスを実現できる。一方で、構造的または作製工程上の制約から実現できるデバイスは限られていた。そこで本研究では、SOI-MEMS の利点を残しながら設計自由度を向上させる、機能集約型 SOI-MEMS を提案し、上記の MEMS 開発が潜在的にもつ課題を解決することを試みた。

従来の MEMS 開発が、工程や層数を増やすことで機能を拡張してきたのに対し、本論文は SOI-MEMS の基本層構造と製造工程を制約条件としながら、デバイスの設計自由度を拡大した。見通しの立ちにくいプロセス開発に取り組むことなく、専用設計された MEMS デバイスを用いて、短期間で機能検証を実施できる環境づくりをねらいとした。少量多品種のデバイスの開発に適した、汎用性の高い MEMS のラピッド・プロトタイプングや、SOI ウエハの材料的な優位性を活かした実用に耐えうる高品質なデバイスを極めて簡単な工程での試作を可能にするなど、具体的な利点も多い。

本論文では、機能集約設計の概念を示すとともに、機能集約型 SOI-MEMS の 3 つの具体的な例を、光可変素子への応用とあわせ記した。設計上の層数を擬似的に増やししながら、実現できる素子の機能を広げる設計思想を提案し、総合的には従来の標準的な 3 層構造の SOI-MEMS を用いながら 6 層相当の設計自由度を得ることが出来た。応用例として示した光ファイバ通信用の光可変減衰器 (Variable Optical Attenuator : VOA) および光コヒーレンス・トモグラフィー (Optical Coherence Tomography : OCT) 用光源に関しては、いずれも原理検証にとどまらず、実使用に耐えうるデバイスとなるまで完成度を向上させた。具体的な応用例とあわせて記すことで、機能集約型 SOI-MEMS の有効性を実証した。

本論文は本文 7 章と謝辞により構成されている。

第 1 章では本論文の背景について述べ、可変光学素子用 MEMS の要件および、その構築に必要となる機能集約型 SOI-MEMS 研究のねらいをまとめる。

本論文の目的は、光可変素子用 MEMS に広く適用できる SOI-MEMS 設計手法を提案し、検証することである。SOI-MEMS は、安定した光学特性と機械的信頼性が同時に提供できる点では光可変素子用途として最適であるが、一方で層構造が限られているため設計自由度に課題があった。これに対して本論文では機能集約設計の概念を提案し、MEMS 技術の光可変素子への幅広い展開を促す基本的な設計思想を具体例とともにまとめた。

機能集約型 SOI-MEMS 設計手法は、上記の通り SOI-MEMS の簡便性を維持しつつ設計自由度を改善しているが、本質的に 3 層構造に起因する課題は残る。本論文中ではこれらに関しても、機能集約型 SOI-MEMS 設計手法の一部として考察し、対策方法を提案している。

第 2 章では機能集約型 SOI-MEMS の例として非対称駆動平行平板 (ASymmetrically driven Parallel plate : ASP) 型チルトミラーMEMS の研究に関して記す。ASP 型チルトミラーは、SOI-MEMS の支持基板に平行平板型静電アクチュエータの下部電極パターンを集約させた構成で、機能集約型 SOI-MEMS の基本構造となる。光ファイバ通信用の VOA への応用を目的として、ASP 型チルトミラーの原理検証から VOA に搭載する実機モデルの研究開発、および環境温度変化や外部から加わる加速度に対する応答メカニズムの解析とその特性改善に取り組んだ結果について記述する。特に MEMS デバイスの開発では、早期立ち上げやファウンダリへの移行も意識して、デバイス構造や製造プロセスの簡素化に努めた。機能集約型設計思想に基づき提案した非対称駆動平行平板型チルトミラーデバイスおよび、それを用いた VOA の設計の詳細を述べるとともに、作製した VOA の諸特性を記述する。

第 3 章では、第 2 章で記した ASP 型チルトミラーの信頼性改善を目的に、浮島構造型ストップを支持基板層に設けた SOI-MEMS を提案する。本研究で定義する浮島構造とは、周囲から電氣的に絶縁された支持基板の一部の領域で、ASP 型チルトミラーと同じ工程で作製できる。対向するミラーなどの構造体と同電位にして動作させ、ミラーのプルイン領域への侵入を防ぐストップとして、また、不要な振動などを抑制するエアダンパとして、MEMS の動特性を向上させる。

ASP 型チルトミラーは、本論文の骨子となる機能集約型 SOI-MEMS の基本的な概念を具体化した一例であるが、可変光デバイスに用いる MEMS としては、さらに設計自由度を高めることが望まれた。具体例として ASP 型チルトミラーに必要とされる改善点を列挙すると、①設計上で静電駆動のプルインが回避可能、②構造的に電氣的短絡のリスクがない、

③過度応答における機械的なリングングが抑制可能、などである。本章では ASP 型チルトミラーの基本構成に加えて、支持基板に電氣的に独立した浮島構造を形成することで、新たな制御パラメタを SOI-MEMS に付加した。プロセスの簡便性や材料的な安定性の特徴は残しながら、本来独立した層で設けられる機能を支持基板に集約することで、SOI-MEMS の設計自由度を拓げることに成功した。デバイスの特性評価は第 2 章と同様に VOA として評価し、機能的な改善だけでなく、実使用に耐えうるレベルでの信頼性などが維持されていることもあわせて検証した。

第 4 章では、SOI-MEMS のデバイス層のパターンのみの改善で、面外方向の作用を発生させる構造を提案する。SOI-MEMS は、予め用意した SOI を加工することで、製造工程を単純化しながら信頼性の高いデバイスを実現できる特徴がある。一方で代表的な MEMS 作製方法のひとつである表面マイクロマシニングと比較すると、各層の電氣的接続や垂直櫛歯型アクチュエータ (Vertical Comb drive Actuator: VCA) の初期オフセットの形成など、面外方向に作用する構造についての設計自由度が低い。これらの構造を作製するための専用工程を SOI-MEMS と組み合わせることは可能であるが、製造工程全体としては複雑になる。そこで本章では、SOI-MEMS の犠牲層エッチング後の乾燥工程で発生するプロセス・スティクションを利用して SOI-MEMS に自己組立機構をもたせた。プロセス・スティクションは、ウェット・プロセスを経た後の乾燥工程で、液体の表面張力によって構造体どうしが引き寄せ合い、表面状態によってはそのまま固着する現象を示す。この現象は、犠牲層エッチング後の乾燥工程で発生することが多く、一般的には望ましくない現象とされるが、ここでは、この現象を積極的に利用することで、従来の SOI-MEMS の工程を維持したまま、面外方向変位を自動的に作り出す。

本章では光部品でスキャナ用のアクチュエータとして利用されることの多い、VCA を上記のプロセス・スティクションを利用して実現した結果について記す。自己組み立て機構の基本要素となる、スティクション・パッド方式を用いて、VC アクチュエータを実現した SAVC (Self Assembled Vertical Comb) について、試作結果と共に記す。

第 5 章では、自己組立型櫛歯アクチュエータを用いた 2 自由度系 MEMS チルトミラーを利用し、SS-OCT (Swept Source Optical Coherence Tomography) 用の高速波長走査型光源を実現した事例について記す。走査速度 140kHz(Bidirectional)、帯域 100nm、コヒーレンス長 3mm の光源性能を達成し、これを組み込んだ OCT システムで、従来比で 4 倍程度まで撮像速度を向上させても、良好な画像が得られることを確認した。断層画像を非侵襲で測定できる OCT 技術は、様々なアプリケーションで実用化の検討が進んでおり、今後は性能だけでなく、信頼性やコストといった面でも改良が必要と考えられる。光可変減衰器応用で確立した機能集約型 SOI-MEMS を医療用光源の研究開発に展開して、競争力の高い MEMS 型光源を実現することで、その有効性を示した。

第6章では、第1章から第5章までに記述した機能集約型 SOI-MEMS 設計について総括する。研究内容を包括的にとらえ、本設計思想の提案について、その成果と意義をまとめる。SOI-MEMS は、SOI ウエハを材料として機械的・光学的信頼性の高いデバイスを実現できる。一方で、構造的または作製工程上の制約から実現できるデバイスは限られていた。そこで本研究では、SOI-MEMS の利点を残しながら設計自由度を向上させる、「機能集約型 SOI-MEMS」を提案し、上記の MEMS 開発が潜在的にもつ少量多品種製品に対する課題を解決することを試みた。

従来の MEMS 開発が、工程や層数を増やすことで機能を拡張してきたのに対し、本論文は SOI-MEMS の基本層構造と製造工程を制約条件としながら、デバイスの設計自由度を拡大した。見通しの立ちにくいプロセス開発に取り組むことなく、専用設計された MEMS デバイスを用いて、短期間で機能検証を実施できる環境づくりをねらいとした。机上での検討のみでなく、試作によるアイデアの実現性や優位性の実証を短期間でおこなう、MEMS のラピッド・プロトタイピングも本研究のねらいのひとつである。本論文で提案した機能集約型 SOI-MEMS 設計手法は、デバイスの層数やプロセスの工程数を増やすのではなく、むしろ SOI-MEMS の層数・標準製造工程を制約としながら、各層に盛り込んだパターンの工夫で、擬似的に層数を増やして設計自由度を向上させることに特徴がある。

第2章から第4章では、本論文で提案する機能集約型設計 SOI-MEMS 設計の具体例について記述している。機能集約型の設計思想に加えて、これらの具体例についても、本研究で独自に考案した新規性の高い構造となっている。

本論文で取り組んだ可変光学素子応用向け MEMS に関する研究開発を、機能集約型 SOI-MEMS 以外の方法で取り組んだ場合、試作に要する時間と、プロセス起因の課題発生率が增大する。具体的には層数が4層以上になると、SOI-MEMS を使用できないため、成膜や張り合わせの工程が増加し、試作期間が数倍となる。加えて各層の形成および加工に伴う不具合の発生率の増加（工程の直行率の低下）や、本質的な開発要素の増加も懸念される。経験的な見通しとして、試作期間の長短は、設計や工程に内在するリスクの大小も示唆するため、最終的な開発期間に対して、単純な比例ではなく指数関数的に影響を及ぼす。

ただし、プロセス開発に、十分な期間と労力を投入できる場合は、必ずしも SOI-MEMS が有利なわけではなく、むしろ他の工法が総合的な視点で優位となることもある。機能集約型 SOI-MEMS 設計に基づいたラピッド・プロトタイピングで、プロジェクト全体の見通しをたてる初期検討や、初期モデルの市場投入までを実施し、市場性やさらなる課題を見極めた上で、改良を目的として、SOI-MEMS より複雑ではあるが、より機能的なデバイスを実現できる設計・プロセスに取り組むような方法もある。

第 7 章では本論文を総括する。本論文の目的は、可変光学素子用 MEMS に広く適用できる設計手法を提案し、検証することであった。安定した特性を有する一方で、設計自由度に課題があった SOI ウェハを加工して作製する SOI-MEMS に対して、機能集約設計の概念を適用することで汎用性を高めた。設計思想の記述だけにとどまらず、機能集約型 SOI-MEMS の具体例と可変光学素子応用の実績まで記した。

本論文の学術的な特色・独創性は、工程や層数を増やすのではなく、むしろ SOI-MEMS の層数・標準製造工程を制約しながら、パターンの工夫で設計自由度を向上させることに、工学的または産業的価値があることを見出したことにある。少量多品種のデバイスの開発に適した、汎用性の高い MEMS のラピッド・プロトタイピングや、SOI ウェハの材料的な優位性を活かした実用に耐えうる高品質なデバイスを極めて簡単な工程での試作を可能にするなど、具体的な利点も多い。第 2 章から第 4 章では、機能集約設計の 3 つの具体的例を光可変素子への応用とあわせ記した。段階的に設計自由度を拡げる手法を提案し、総合的には従来の標準的な 3 層構造の SOI-MEMS を用いながら 6 層相当の設計自由度を得ることが出来た。応用例として示した光ファイバ通信用の VOA および SS-OCT 用光源に関しては、いずれも原理検証にとどまらず、実使用に耐えうるデバイスとなるまで信頼性などを含めて完成度を向上させた。開発過程で得た、SOI-MEMS の課題を補完するノウハウに関しても、機能集約型 SOI-MEMS の設計技術の一部として論文中にあわせて記述した。