

# Silicon Micromachined Resonators for Sensor Applications(センサのためのシリコンマイクロマシニングによる共振子の研究)

|     |   |
|-----|---|
| 著者  | Cleopatra Cabuz   |
| 号   | 1509  |
| 発行年 | 1994  |
| URL | <a href="http://hdl.handle.net/10097/10316">http://hdl.handle.net/10097/10316</a> |

|           |   |              |
|-----------|---|--------------|
| 氏 名       | クレオパトラ<br>Cleopatra   | カブツ<br>Cabuz |
| 授与学位      | 博士（工学）  |              |
| 学位授与年月日   | 平成6年7月13日   |              |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第2項  |              |
| 最終学歴      | 昭和54年6月<br>ブカレスト工科大学電子工学科卒業   |              |
| 学位論文題目    | Silicon Micromachined Resonators for Sensor Applications<br>(センサのためのシリコンマイクロマシニングによる共振子の研究) |              |
| 論文審査委員    | 東北大学教授 江刺 正喜    東北大学教授 渡辺 忠雄<br>東北大学教授 羽根 一博    東北大学教授 長南 征二                                |              |

## 論 文 内 容 要 旨

### 1. Introduction

During this research, the possibility of realizing highly sensitive micromechanical sensors was investigated. Modulation of the resonance frequency of a vibrating micromechanical structure which has high quality factors was used as the conversion principle. This principle was applied to a new type of infrared sensor and to some inertial sensors like the resonant angular rate sensor. On-chip NMOS circuitry was realized in order to reduce the influence of parasitic and to prove process compatibility. One port electrostatic excitation/capacitive detection with a floating electrode on the resonator was demonstrated as a highly efficient configuration for thermally isolated resonators. Refined circuits for signal detection were used in order to enhance the efficiency of the detecting step.

p+silicon was used as the thin etch-stop layer in some of the fabricated structures. Process dependence of stress distribution in the p+layer was studied by using microphysical investigations (Secondary Ion Mass Spectroscopy and Microprobe Raman Spectroscopy). A new theory is formulated for the appalition of the compressive stress in p+layers.

Dynamic behavior of p+ resonators was also studied. Young's modulus, internal stress and quality factor were studied in relation with process sequence. Such measurements clarified the wide spread in the previously published values of these parameters. All the structures were designed and studied by using ANSYS simulations.

## 2. The mechanism of compressive stress development in p+ silicon

In Figure 1 the elastic strain in a layer of boron doped silicon is shown as a function of boron concentration [ 1 ]. In the elastic region (segment a), the strain is equal to lattice mismatch. At a critical level, the yield strain of silicon at the diffusion temperature is reached and the lattice will collapse through the generation of dislocations (segment b). When boron ex-diffuses from the layer, like it happens actually in an oxidation process or a long drive-in, the residual elastic strain will relax following the curve e in Figure 1 .

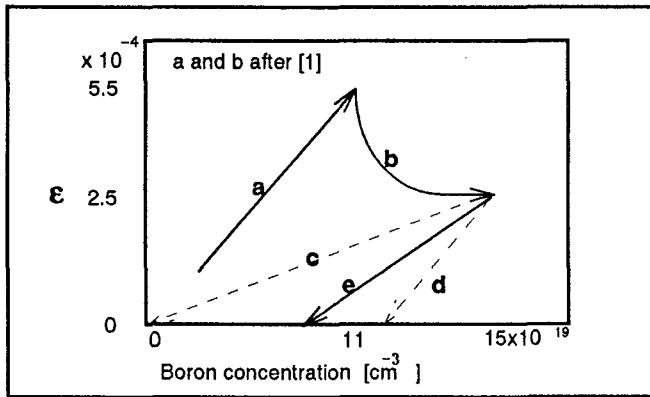


Figure 1 Dependence of intrinsic strain ( $\epsilon$ ) on boron concentration in silicon layers heavily doped with boron.

The decrease of boron concentration under a certain level will be equivalent to doping silicon lattice which is slightly smaller than ordinary silicon lattice. Silicon atoms will produce a *compressive stress*.

## 3. The resonant infrared sensor

When an optical power is incident on a microresonator a photothermally induced stress variation is generated in the resonator giving rise to a change in the resonance frequency related to the infrared power. The schematic structure of the resonant IR sensor is shown in Figure 2. The excitation/detection circuit for operation of resonator at constant amplitude on a selected mode of vibration is shown in Figure 3. The responsivity to IR power is shown

in Figure 4.

#### 4. The resonant angular rate sensor

A resonant angular rate sensor was fabricated in the next technical solutions : (a) tuning fork motion for the excitation mode and torsional motion for the detection mode. These resonators shows high Q factors. (b) electromagnetic excitation for large amplitude of vibration ; suitable mechanical design for the matching of the resonance frequencies in the two motions ; (d) symmetrical structure for reduced mechanical coupling. The structure is shown in Figure 5. The response to angular rate is shown in Figure 6.

#### 5. Conclusions

The problems of miniaturization in sensors based on micromechanical structures were analyzed. The main applications were : the resonant infrared sensor, the angular rate sensor with electromagnetic excitation and capacitive detection.

Statical behavior of p+silicon microstructures was analyzed using microphysical investigations. Relevant parameters of p+silicon microresonators were evaluated.

#### REFERENCES

1. J. Herzog, L. Csepregy, H. Seidel, "X-ray investigation of boron-and germanium-doped silicon epitaxial layers", J. Electrochem. Soc., vol. 131, pp. 2969-2974, 1984

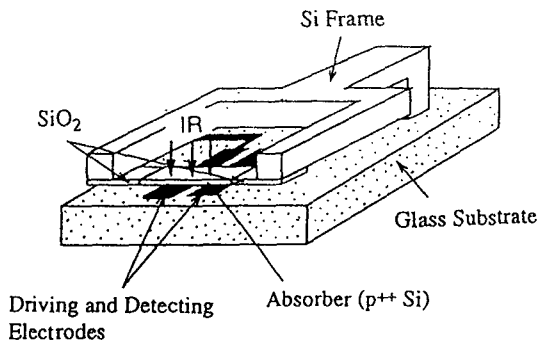


Figure 2. Schematic structure of the resonant IR sensor

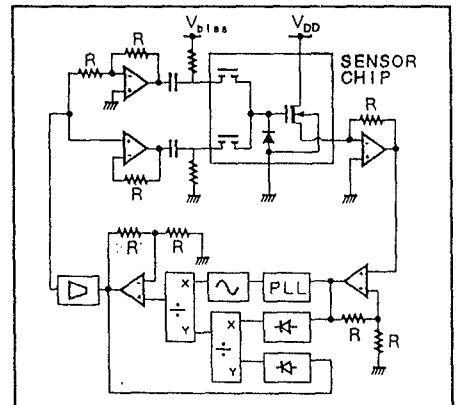


Figure 3. Self oscillating circuit

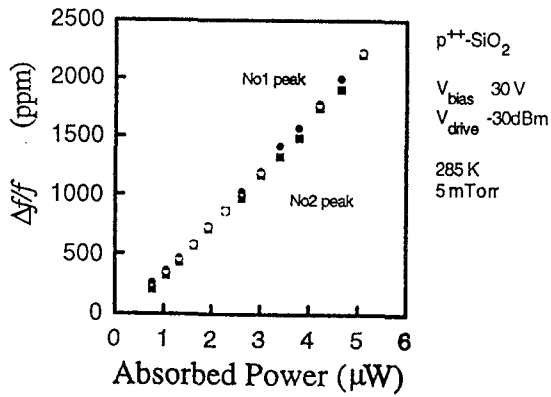


Figure 4. Responsivity of the resonant IR sensor

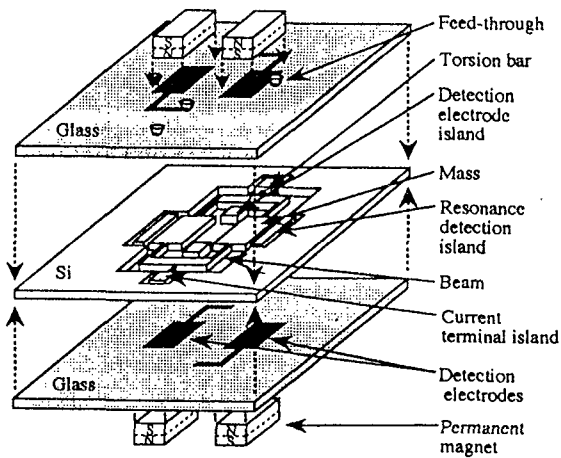


Figure 5. Structure of the resonant angular rate sensor

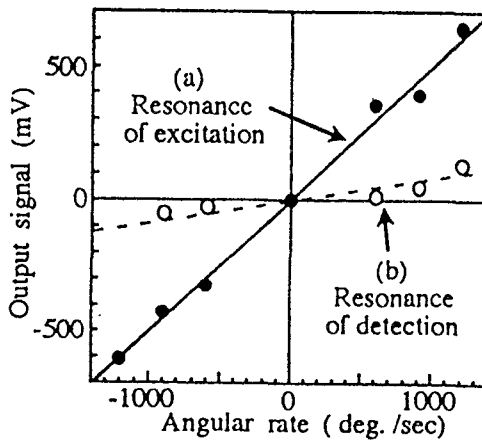


Figure 6. Sensitivity of the resonant angular rate sensor

## 審査結果の要旨

小形で高感度なセンサを実現する手段として振動型センサが有望視されている。これは測定対象の量による共振周波数変化などを検出するものである。特にシリコンは内部摩擦が小さく、これを素材に用いた共振子はQファクタを大きくできるため、極端に高感度なセンサを実現する手段となり得る。

著者は、マイクロマシニングと呼ばれる半導体微細加工技術を応用してシリコン基板上に共振子を製作し、これを高感度センサとして利用する研究を行なった。本論文は、これらの成果をとりまとめたもので全文6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、マイクロマシニングで特に共振子の製作に関わる要素技術としての、シリコンの薄い梁を作る選択エッチング技術、および共振子のパッケージング技術について述べている。

第3章では、共振子に使用する高濃度にボロンを添加した $p^+$ シリコンについて、2次イオン質量分析計や顕微ラマン分光法などの手段を用いて研究している。ボロンとシリコンの原子半径の違いによる格子不整合で、引っ張り応力、あるいは転位発生と酸化時の再分布に伴い圧縮応力が発生する機構を明らかにし、従来示されてきた実験結果を統一的に説明できた。これは重要な成果である。また正確な梁厚の測定技術を確立し、この値と共振周波数より $p^+$ シリコンのヤング率を求めると、共振子の材料特性を明らかにした。

第4章では、薄板の両持ち梁構造で実現した振動型赤外線センサについて述べている。 $p^+$ シリコンの両端を酸化シリコンで支えた両持ち梁構造を静電引力で駆動し静電容量により振動検出を行なうもので、赤外線吸収に伴い温度が上昇すると熱膨張で応力が緩和し共振周波数の変化を生じるものである。容量検出回路の集積化やパッケージングの工夫などで、高感度の赤外線センサを実現している。

第5章では、静電引力によって共振子に軸力を与え共振周波数を一定に制御した、サーボ方式の振動型センサについて述べている。

第6章では、振動型角速度センサを製作した結果について述べている。両端支持音叉構造のシリコン共振子に、微小な電流を流し電磁駆動で共振させ、コリオリカによって発生するねじり振動を静電容量で検出するものである。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、シリコンのマイクロマシニング技術により振動型センサを実現する研究を行ない、その設計指針を明らかにしたものであり、精密工学、微小機械学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。