

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20710102

研究課題名(和文)

シリコンリング型光共振器を用いたマイクロ加速度センサの研究

研究課題名(英文)

A Study of Micro-Accelerometer Using Silicon Ring Resonator

研究代表者 鈴木 昌人(SUZUKI MASATO)

関西大学・システム工学部・助教

研究者番号：70467786

研究成果の概要(和文)：

シリコン製光導波路中を伝搬する光の干渉を利用した高感度かつ小型な加速度センサを新たに提案した。このセンサでは光導波路がマッハツェンダ干渉計(MZI)の構造を取っており、さらにその分岐した導波路の一方が浮遊化しており、加速度印加によりたわむ。この結果、MZIの出力が変調する仕組みである。また、本センサ中では感度向上のために光導波路に片持梁を交差させているが、この交差部での光学損失を抑える手法として、多モード干渉(MMI)の利用を提案した。この効果は光学シミュレーションと実験結果より確認した。最終的に、作製した加速度センサの出力が力印加により変調することも確かめられた。

研究成果の概要(英文)：

A concept accelerometer was newly proposed which uses an optical interference of propagated light in Si waveguide. In this sensor, one waveguide of Mach-Zehnder interferometer (MZI) has floating beam structure (air-bridge type) which crosses with a cantilever supporting a proof mass in same plane. When the inertial force is applied to the proof mass, the floating waveguide is expanded and the output of the MZI is modulated. As a result of optical simulation and measurement of fabricated device, optical loss at the intersection of waveguide and supporting cantilever (50 μm in width) becomes very small when the waveguide at the intersection is Multi-Mode interference (MMI) waveguide. Finally, we confirm the performance of the fabricated accelerometer by measurement of its optical modulation response to applying force.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：マイクロ・ナノ科学 ・ マイクロ・ナノデバイス

キーワード：加速度センサ, 光リング共振器

1. 研究開始当初の背景

変位、加速度、圧力等を検出するセンサの内、機械構造の変化を電気信号等に変換してセンシングするものは機械量センサと総称される。これらのセンサは、様々な動力機械(例:ロボット、自動車)の制御に必須であり、現在もその応用例は広がり続けている。更にこれらは高機能化、低コスト化等の観点からMEMS技術を用いた小型化、高感度化が進められてきた。MEMS分野では集積回路(IC, LSI等)の発展を支えてきた様々な微細化技術を積極的に利用することで、マイクロメートル級の微細構造の形成を可能にしてきた。今後もこの微細化技術は更に発展していくと予想され、これに伴い上記の機械量センサも更なる小型化が期待されている。しかしながら、近年ではこの小型化が困難になってきている。機械量を検出する方式としては、静電力、圧電力、圧電抵抗等を利用するのが一般的であるが、これらの方式ではセンサの縮小化に伴い感度が低下するという問題点がある。従って、従来のセンサより高感度なセンサ方式の発案・開発に対する要求は非常に強い。

一方、申請者がこれまで従事してきた半導体工学の分野において、集積回路の基板として利用されてきたシリコン(Si)の単結晶を光学分野に応用する研究が盛んに行われている。特に図1に示すようなリング状のSi光導波路を用いた光共振器は大きな注目を集めている(國分 泰雄: 応用物理, Vol. 72, pp. 1364-1373, 2003)。このSiリング型光共振器の出力は図2に示すように大きな波長依存性を持つ。これは伝搬光の波長がリングの周長の整数倍となる場合のみ光の重ね合わせ現象による増幅が起こる為である。このとき、周回する光の損失が大きいほどその増幅係数(Q値)が増大する為、高品質なSi単結晶を利用することで極めて高いQ値が得られる。現在では 10^4 以上のQ値を実現したという報告がなされており(S. Maine *et al.*, 4th Int. Conf. Group IV Photonics, WP41, 2007.)、この特性を生かした様々なデバイスが開発されている。

このような背景から、申請者はSiリング光共振器を機械量センサに応用するという着想に至った。機械量変化の検出という観点からSiリング光共振器を評価した場合、そのQ値がリングと入出力導波路との距離に大きく依存するという点に注目すべきである。従って、リングまたは導波路の一方を固定し、他方を可動とした場合、その出力は可動部の変位によって大きく変化する。

従って、Siリング光共振器は機械量の変化を検出するセンサとして非常に適しているといえる。またSiリングは直径 $10\ \mu\text{m}$ 程度まで縮小化が可能なので、センサの小型化という目的にも適している。

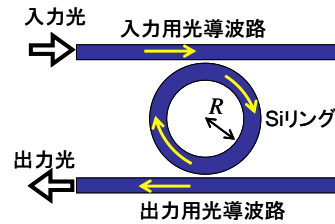


図1 光導波路型リング共振器の概形

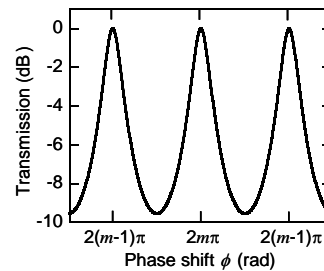


図2 光導波路型リング共振器出力の波長依存性

2. 研究の目的

研究開始段階で想定していたセンサの構造を図3に示す。このセンサはSilicon on Insulator (SOI) と呼ばれるSi/SiO₂/Siの3層構造を持つ基板を利用して作製する。Siリングと入力用の光導波路はSOI基板の加工により形成し、リング上層に中空構造の光導波路を形成して出力用導波路とする。センサに加速度が加わると出力用光導波路が歪んでSiリングとの距離が変化する為、出力光強度が変わる仕組みである。従って、この出力導波路は適切な弾性率と良好な光学特性を合わせ持つ必要がある。ただし、本申請期間中に図3に示すような複雑なシステムを開発することは困難である。そこで、まずその準備段階として、同じシリコン導波路と伝搬光の光学干渉を利用した加速度センサを提案、開発、その特性を観察することを目的として本研究を開始した。

3. 研究の方法および成果

3.1. Si導波路型マッハツェンダ干渉計を利用した加速度センサの提案

提案する加速度センサの概形を図4に示す。このセンサは結晶Siをコアとしたマッハツェンダ干渉(Mach-Zehnder interferometer, MZI)型光導波路の構造を採っており、更に

分岐した導波路の一方が浮遊構造（ブリッジ型）になっている。この浮遊導波路に加速度が印加されると、浮遊導波路がたわみ、光の干渉により出力光が変化する。ただし、浮遊導波路自体の質量は非常に小さい為、単独では印加された加速度に対する変位も小さい。そこで、この浮遊光導波路にカンチレバーを交差させ、その先端に「重り」（マス）を付加することでセンサの感度を向上させる。ここで、片持ち梁は機械的に強靱であることが要求される為、結晶 Si を用いる必要がある。このため、浮遊光導波路と片持ち梁は、同一平面上で交差させなくてはならない。

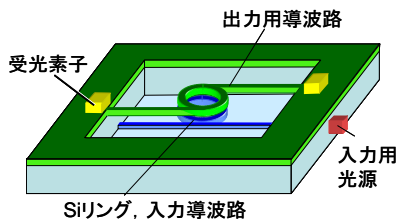


図 3 提案するリング共振器を用いた加速度センサの概略図

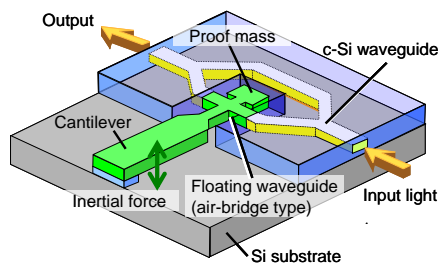


図 4 提案する光導波路型マッシュツェンダ干渉計を用いた加速度センサの概略図

3.2. 本センサの原理および課題

本構造の上面図を図 5 に示す。前述のように、本センサにおいてはブリッジ型の光導波路と片持ち梁は同一平面上で交差されている。梁の先端にマスが付加されており、基板に垂直な加速度が印加されることにより、梁と浮遊導波路がたわむ。その結果、浮遊導波路の実効的な長さが増大する為、光干渉によりセンサの出力が変化する。この時の光導波路の実効長と光出力の関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta I &= \frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} \cdot [1 + \cos \delta] \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \cos \left(\frac{\Delta L_0}{\lambda} \right) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 I は MZI の出力値、 I_0 は加速度が印加されていないときの MZI の出力値、 δ は浮

遊導波路を伝搬する光と固定導波路を伝搬する光の位相差、 λ は伝搬光の波長、 ΔL_0 は加速度により浮遊導波路がたわんだ際の、実効的な光路長の増加分である。式(1)は更に次のように変換される。

$$\Delta I = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi n \Delta L}{\lambda} \right) \right] \quad (2)$$

ここで、 n は導波路のコア材料である Si の屈折率 ($n=3.4$)、 ΔL は浮遊導波路の機械的延長距離である。浮遊導波路の初期の長さを 1000 mm とした場合、式(2)より計算される ΔI と浮遊導波路の中央におけるたわみの関係は図 5 に示すようになる。

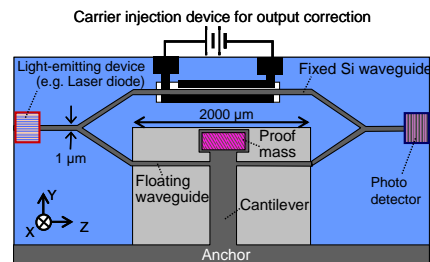


図 5 図 4 に示す加速度センサの上面図

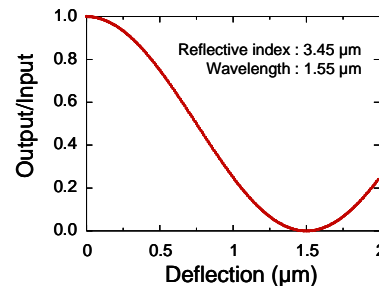


図 6 計算される ΔI と浮遊導波路のたわみの関係

3.3. マルチモード干渉による光交差損失の低減

図 4 に示す MZI 型加速度センサにおいては、浮遊導波路と片持ち梁は同一平面状で交差している為、交差部分において浮遊導波路を伝搬する光が梁へと散逸してしまう。この交差部分における光損失を低減する手段として、交差部分にマルチモード干渉 (MMI) 導波路を挿入する方式を提案する。マルチモード干渉とは、複数のモード光を互いに干渉させることであり、適切に制御された MMI により様々な光学的機能が実現可能である。シングルモードの光導波路と MMI 光導波路を直列に接続した場合、シングルモードで伝搬していた光が MMI 導波路において複数のモードに分裂し、お互いに干渉しあう。この結果、MMI 導波路内では図 6 に示すような定

在波が発生する。この定在波には光強度の弱い領域が存在するため、導波路側面の「弱い領域」に合わせて梁を交差させることで伝搬光の梁への散逸を最小限に抑制することが可能となる。本研究においては、MMI 導波路と梁の平面交差による光損失を2次元ビーム伝搬法を用いたシミュレーションにより評価した。なお、入力光の偏光としては、TEモードのみを扱った。

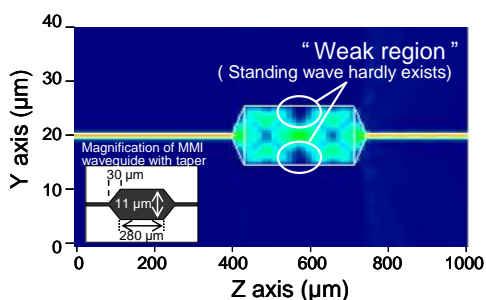
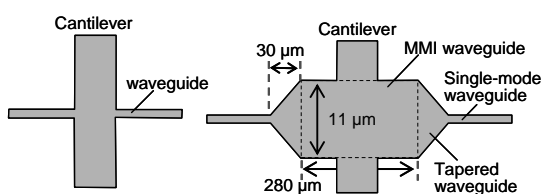


図6 MMI 光導波路中に発生する定在波の様子



(a) MMI を用いない交差 (b) MMI による交差

図7 計算される ΔI と浮遊導波路のたわみの関係

最初に、図7に示すようなシングルモード導波路と梁の交差による光損失を評価した。この結果を図8に示す。本節冒頭に述べたように、交差部分を透過する伝搬光の強度は、交差する梁 W_c の幅の増加に従って急速に増大する。

この評価結果を元に、図7(b)に示す導波路形状において、梁の幅 W_c を変化させた場合の光透過率を計算した。その結果、図9に示すように、幅 $50 \mu\text{m}$ という非常に幅の広い梁と交差させた場合でも、梁と MMI 導波路との交差領域が定在波の「弱い」領域中に入っている為、伝搬光が梁へと散逸しないことが確認された。また、図10に示す、交差部における光損失の W_c 依存性より、 $W_c \leq 50 \mu\text{m}$ における光損失は 0.3 dB 以下と、極めて小さいことが分かった。ただし、 $W_c > 50 \mu\text{m}$ においては急速に光損失が増大する為、幅の広い梁と交差させる場合には適していない。

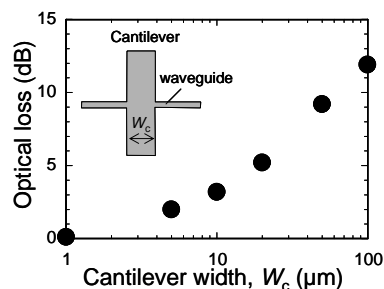


図8 シングルモード導波路と梁の交差交差部における光損失と梁の幅の関係

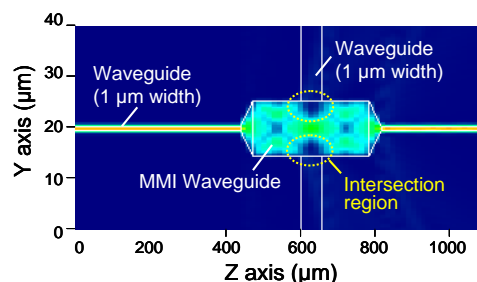


図9 MMI 導波路中と梁(幅 $50 \mu\text{m}$) を交差させた場合の光強度(シミュレーション結果)

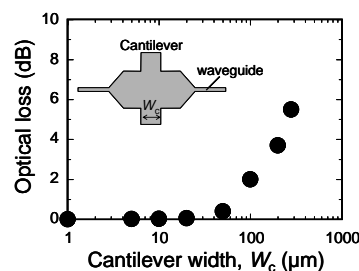


図10 MMI 導波路と梁の交差部における光損失と梁の幅の関係

3.4. 浮遊導波路と片持ち梁の交差形状の機械特性評価

次に、浮遊導波路と片持ち梁が交差した形状に加速度を印加した場合の導波路のたわみを3次元有限要素法(3D FEM)を用いたシミュレーションにより評価した。ここで、評価対象の上面概略図を図11に示す。この図において、片持ち梁の先端はマスの形成を想定した領域であり、本評価においてはこの領域にX軸方向の力を印加する。この状態で、浮遊導波路と片持ち梁の交差領域の中央点が、力の印加前と比較してX軸方向にどれだけ変位したかを評価する。以後は、この変位を交差部分における「たわみ」とする。なお、本評価において、浮遊導波路長は $2000 \mu\text{m}$ 、交差部分は浮遊導波路の中央点で固定した。

まず、導波路長 L_c を $1000 \mu\text{m}$ に、 W_c を $10 \mu\text{m}$ に固定して、たわみの印加力依存性を評価した。その結果を図12に示す。この図

より、たわみは印加した力に比例して増大することが分かった。そこで、以後の評価においては、印加する力を 9×10^{-8} N（マスとして体積 10^{-13} m³ の Ni を想定した場合、マスに掛かる重力加速度）に固定する。次に、たわみの L_c , W_c 依存性を評価した。その結果を図 14 に示す。図 5 に示すように、本研究で提案する MZI 型加速度センサにおいては出力を 100% 変調させるためには浮遊導波路を 1.5 μ m だけたわませる必要がある。しかしながら、図 13 より、幅 5 μ m の梁と交差させた導波路を 1.5 μ m たわませるには梁の長さを約 600 μ m にする必要があり、梁の長さとおよび幅の比が大きくなってしまふ。このような梁は機械的な破壊耐性が小さい。破壊を避ける為に更なる工夫が必要であると考えられる。

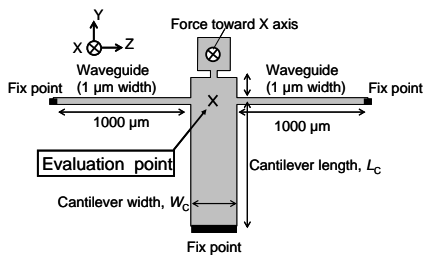


図 11 機械特性シミュレーション対象の概略図

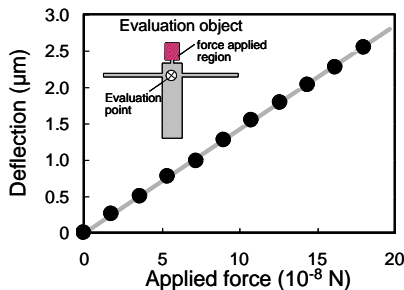


図 12 梁のたわみと印加した力との関係

3.5. デバイスの作製および評価

次に、SOI ウェハを利用して加速度センサの作製を行った。デバイスの設計図を図 14 に示す。光導波路の浮遊化は、光導波路の下地となる SOI ウェハの埋め込み酸化膜 (Buried Oxide, BOX) 層を蒸気フッ酸を用いて除去することで実現した。ただし、予備実験の結果より、上部の Si パターンがあまりに広い場合、BOX 層が完全に除去されない場合があることが判明した。この為、図 15 に示す設計図において、片持ち梁にエッチングホールを設けた。完成したデバイスの中空導波路および片持ち梁の交差部の顕微鏡写真を図 15 に示す。

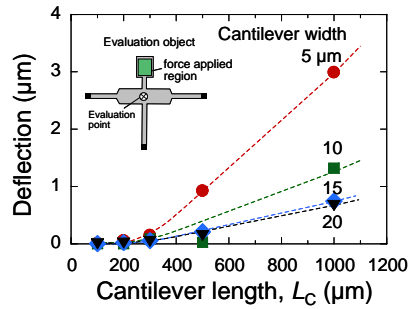


図 13 梁のたわみと梁の幅および長さとの関係

デバイス特性を評価する為の測定系を図 16 に示す。この測定系を用いて、まずデバイスの光伝搬特性を測定した。シングルモードの導波路に MMI 導波路を付加した場合の挿入損、その MMI 導波路に片持ち梁 (幅 50 μ m) を交差させた場合の交差損を図 17 に示す。この結果より、MMI 導波路を用いることで、幅の広い構造体と光導波路を非常に小さな損失で交差させることが可能であることが証明された。

最後に、作製した加速度センサに力を印加した場合の出力の変化を図 18 に示す。この結果より、このセンサの出力が力印加により変化し、加速度センサとして動作することも証明された。

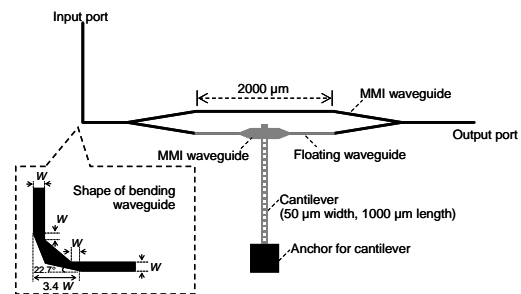


図 14 作製した加速度センサの設計図

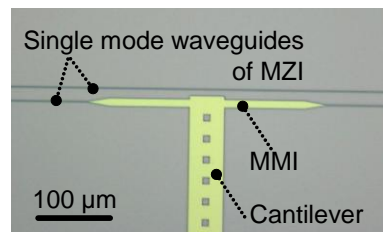


図 15 作製したセンサの光学顕微鏡像

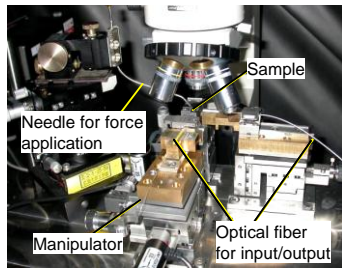


図 16 作製したセンサの測定系

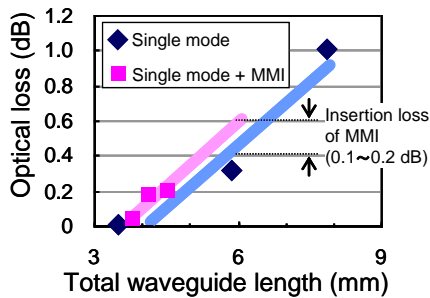


図 17 MMI 導波路の挿入による伝搬光の損失

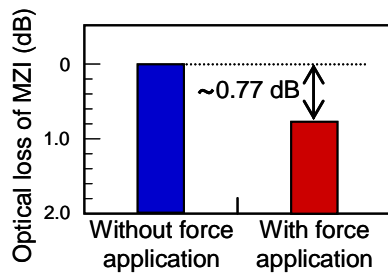


図 18 力印加による加速度センサ出力の変調

4. まとめ

Si 導波路を伝搬する光の干渉を利用した小型かつ高感度な加速度センサの開発を実施した。本研究においてはセンサの動作原理として、リング共振を利用するものとマッハツェンダ型干渉を利用するものの2種類を提案したが、そのうちマッハツェンダ型干渉を利用する原理に基づいて開発を進めた。開発においては、シミュレーションによるデバイス光学・機械特性の評価とこれを用いた構造の最適化、作製およびその評価を実施した。その結果、デバイス中の伝搬光の損失を低減させること、および力印加による出力光強度の変調に成功した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

1. M. Suzuki, G Kawai, H. Izumi, S. Aoyagi, S. Yokoyama, T. Takahashi, S. Aoyagi, Y. Amemiya, M. Fukuyama, S. Yokoyama, "A Design and Simulation of Inertial Force

Sensor Using Mach-Zehnder Interferometer with Optical Waveguides Made of Crystal Silicon," IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines (査読有), Vol.129, pp.301- 306 (2009).

2. M. Suzuki, T. Takahashi, S. Aoyagi, Y. Amemiya, M. Fukuyama, S. Yokoyama, "A Study of Mach-Zehnder Interferometer Type Optical Modulator Applicable to an Accelerometer," Japanese Journal of Applied Physics (査読有), Vol.50, pp.04DG14-1 - 04DG14-6 (2011).

[学会発表] (計3件)

1. M. Suzuki, G Kawai, H. Izumi, S. Aoyagi, S. Yokoyama, "Inertial Force Sensor Using Mach-Zehnder Interferometer with Optical Waveguides Made of Crystal Silicon," 25th Sensor Symposium on Sensors Micromachines and Microsystems, Ginowan-shi, Japan, 22-24 Oct. 2008.
2. 鈴木昌人, "マルチモード干渉を利用した Si 光導波路の平面交差とその慣性センサへの応用," 電気学会 E 部門総合研究会, 八王子市, 2009年7月22-24日.
3. M. Suzuki, K Nishioka T. Takahashi, S. Aoyagi, Y. Amemiya, M. Fukuyama, and S. Yokoyama, "Development of Accelerometer Using Mach-Zehnder Interferometer Type Optical Waveguide," 2010 International conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2010), Toyo, Japan, 22-24 Sep. 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 昌人 (SUZUKI MASATO)
 関西大学・システム理工学部・助教
 研究者番号: 70467786

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし