

フォーカス 26 <第 1 3 回> : 成果事例クローズアップ (シリコンナノ加工と高品質真空利用技術に関する支援) マッハツェンダ型光干渉計を利用した加速度センサの開発

関西大学大学院システム理工学部 鈴木昌人, 河合剛, 青柳誠司

広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学研究所 福山正隆, 坂本憲児, 笠間敏博, 松垣仁, 横山新



関西大学 (左から) 青柳誠司, 鈴木昌人



広島大学 (左から) 横山新, 福山正隆, 坂本憲児, 笠間敏博, 松垣仁

図 1 研究メンバー

1. はじめに

本研究では、ナノスケールの微小な Si 光導波路を利用した慣性センサの作製を目標として実施した。このセンサは、マッハツェンダ型光導波路の一部を中空 (両持ち梁構造) 化した構造を有しており、慣性力が中空導波路に印加されると、この光導波路が歪んで出力が変化する。導波路の中空化は、導波路直下の SiO₂ 膜を蒸気フッ酸 (HF) により除去することで実施した。研究の結果、作製したデバイスの力印加による出力変化に成功した。この成果は、国際会議 25th Sensor Symposium 2008, Okinawa Japan Oct. 2008 等において発表された [1][2]。

本研究の一部は文部科学省の「先端研究施設共用イノベーション創出事業」(ナノテクノロジーネットワーク) に参画する広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所

*問い合わせ:

シリコンナノ加工と高品質真空利用技術に関する支援

広島大学 ナノデバイス・バイオ融合科学研究所

〒724-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-2

電話: 082-424-6265

E-mail: nanotech@hiroshima-u.ac.jp

所の「シリコンナノ加工と高品質真空利用技術に関する支援」(シリコンナノ加工に関する支援)を受けて実施した。図 1 に支援依頼元と支援に携わったメンバーの写真を示す。

2. 背景

次期 LSI 配線では、高速化、高集積化、低消費電力が課題であり、抵抗や配線間容量を考えなくてもよい光配線が有力候補である。光配線を実現するために必要な素子の一つに光リング共振器光スイッチがあるが、広島大学の横山 新教授の研究室では、その低電圧化および変調率の向上に注力中である (図 2)。一方リング共振器光スイッチを別の用途として活用することも研究中である。すなわち抗原がリング共振器に吸着すると屈折率が変化することを利用するバイオセンサとしての応用である (図 3)。さらに関西大学においては、Si 光導波路の機械的な歪みの変化による屈折率の変化を利用した慣性力センサ (図 4) を研究中である。いずれも Silicon on Insulator 基板 (以下 SOI) を利用し、広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所の装置 (図 5-8) および作製方法を利用

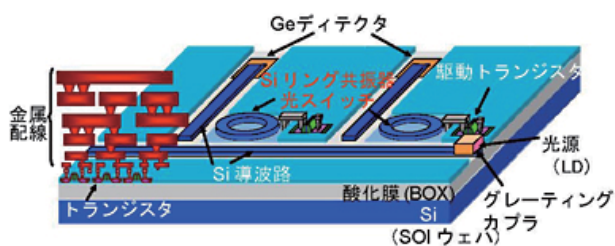


図 2 光配線 LSI の構造

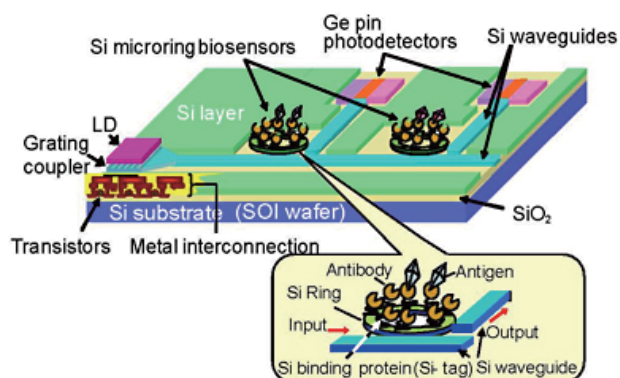


図 3 光リング共振器を利用したバイオセンサの構造

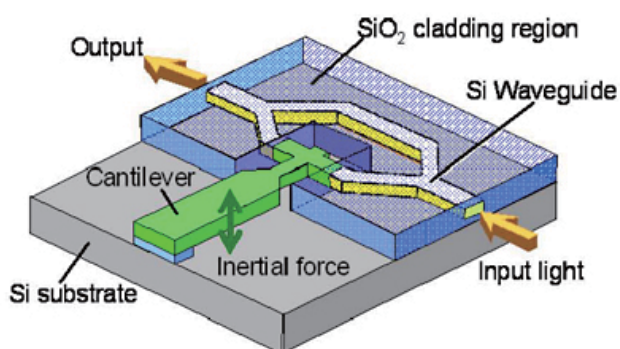


図 4 Si マツハツエンダー光干渉計と Si カンチレバーを組み合わせた慣性力センサーの構造



図 5 ケミカルフィルター設置のスーパークリーンルーム

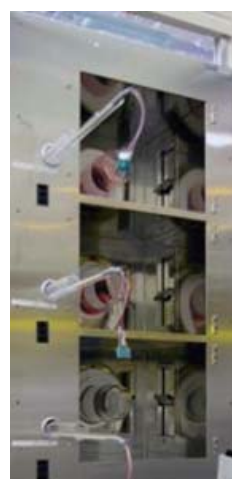


図 6 酸化炉



図 7 電子線描画装置

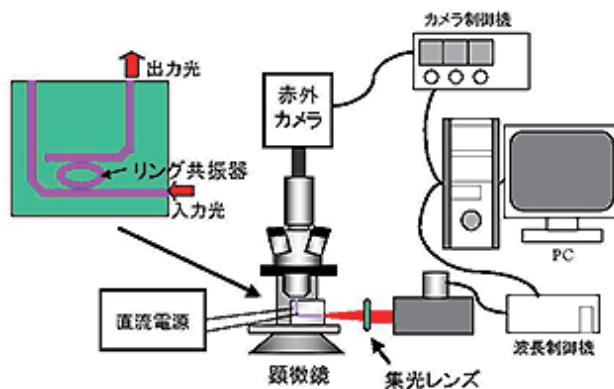


図 8 光学測定装置

している。慣性力センサでは、まずナノ光導波路を両持ち梁構造にし、印加された慣性力による光導波路の機械的な変形を光出力の変化として出力しなくてはならない。これまで、この両持ち梁構造のナノ Si 光導波路を実際に作製し、慣性力による光導波路の変形を測定すること、更にその結果を利用して実際のセンサを作製（図 9, 10 に作製例）したが、本稿では、この Si 光導波路の平面交差形状、およびセンサ構造の最適化について述べる。

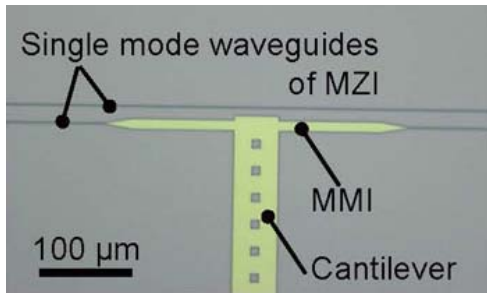


図9 MZI(マッハツェンダ光干渉計)型慣性力センサのカンチレバー交差点近傍のMMI(マルチモード干渉導波路)部の光学顕微鏡写真

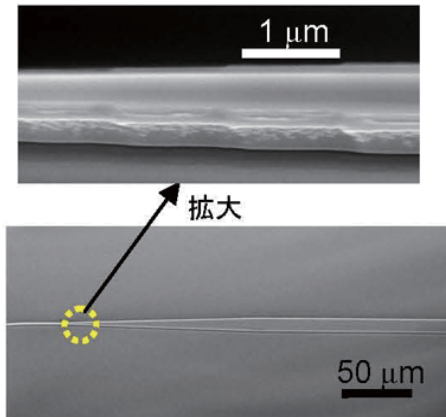


図10 慣性力センサのMMI部のSEM写真

3. 研究目的

近年、MEMS技術を利用して非常に小さな慣性力センサ(例えば加速度や角速度)の作製が可能になり、さらなる小型化、高性能化を目指して多くの研究がなされている[3][4][5][6]。これらのMEMSセンサは平行平板容量やピエゾ抵抗の変化によって慣性力を検出しているが[3][4]、その感度はセンササイズの縮小と共に減少する傾向にある。そこで、センササイズの更なる小型化のため、新しい慣性力の検出手法の提案が要求されている。

光学干渉は、この問題を解決する手法として非常に有望である。一般的に、光信号は電磁波や寄生容量の影響を受けない為、センササイズを小さくしてもノイズが大きくなるという利点がある。この為、多くの光学式慣性力センサが研究されてきた。例えば、J. Zhou等によりファブリペロ光共振を利用した慣性力センサが報告されている[5]。しかしながら、従来報告されている光干渉式の慣性力センサでは、検出に利用する光を自由空間で伝播させる必要がある。この為、センサと発光/受光素子を一体化させる場合、高精度な光軸調整が必要となり、パッケージングコストが増大するという問題点を有している。この問題の解決法として、光導波路の利用が考えられる。光導波路の場合、発光/受光素子を直接付加可能であるため、光軸調整が比較的容易である。

このような背景から、我々は結晶Siをコア材料とす

る導波路中を利用した慣性力センサを提案する。現在、SOIの普及に伴い、結晶Siを光導波路のコアとして利用する研究が盛んに行われている[7][8]。結晶Siは波長約1150nm以上の赤外光に対する光透過性が高く、また屈折率が約3.4と高いため、微細な光導波路デバイスの作製に適している。提案する慣性力センサの概形を図3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。この浮遊導波路に慣性力が印加されると、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慣性力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。

本稿では、このSi光導波路の平面交差形状、およびセンサ構造の最適化について述べる。

4. 本センサの原理および課題

図3に示した慣性力センサの上面図を図11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、基板に垂直な慣性力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。

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

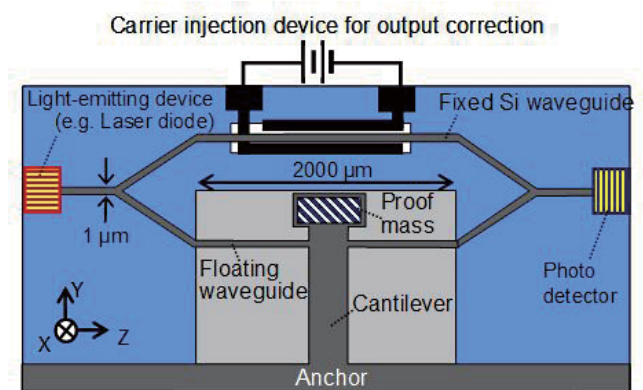


図11 提案する慣性力センサの上面図

ここで、 I は MZI の出力値、 I_0 は慣性力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 は慣性力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伸長距離である [9] [10]。浮遊導波路の初期の長さを $1000\mu\text{m}$ 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 12 に示すようになる。

5. マルチモード干渉による光交差損失の低減

図 3 に示す MZI 型慣性力センサにおいては、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為、交差部分にマルチモード干渉 (MMI) 導波路を挿入することを提案する。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 13 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。

最初に、図 14 (a) 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 15 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。

次に、MMI 導波路形状と、MMI 導波路の挿入損失の関係を評価した。その結果、図 16 (a) に示すような矩形の MMI 導波路では、挿入損失の MMI 導波路長依存性が大きく、最適な導波路長から僅かに変化しただけで、急速に挿入損失が増大することが分かった。この問題は、MMI 導波路の両端にテーパ形状を付加することで緩和可能である。ただし、テーパ角度が非常に小さい場合、図 16 (b) に示すように定在波が立たない。この評価結果を

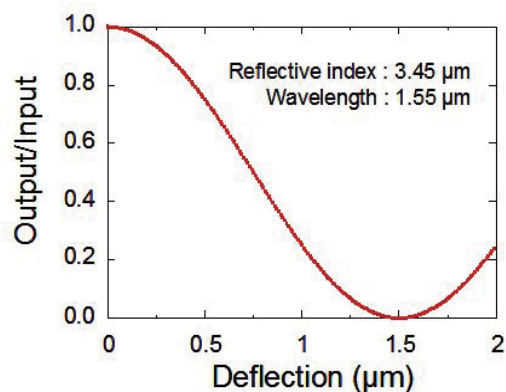


図 12 提案する慣性力センサにおける浮遊

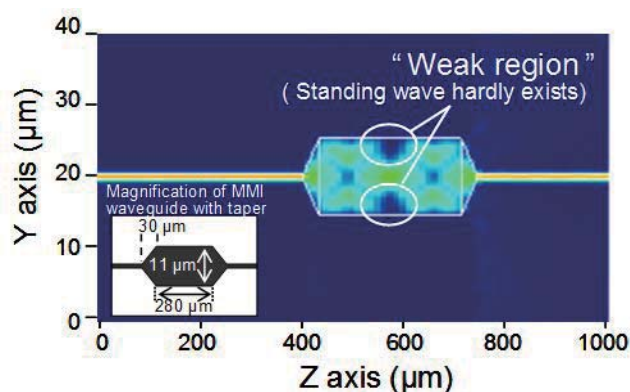


図 13 MMI 光導波路中に発生する定在波の様子

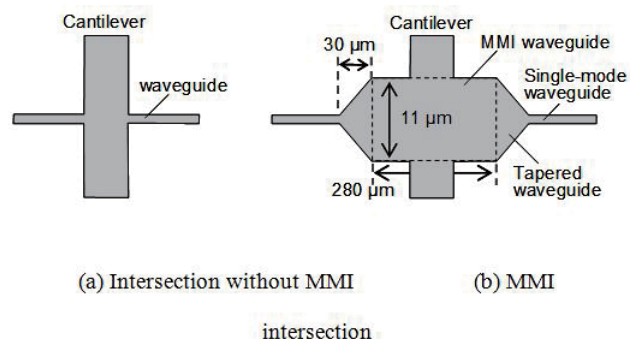


図 14 光学シミュレーションの評価対象の概形

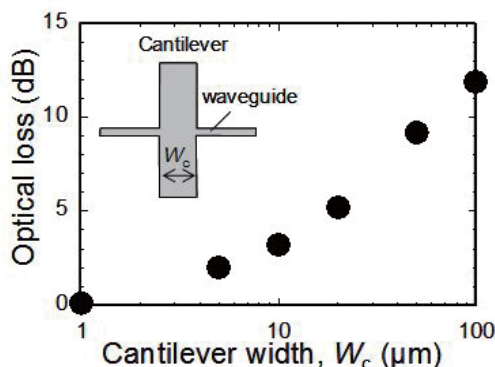
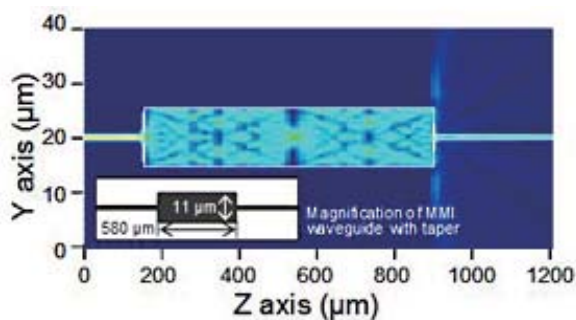
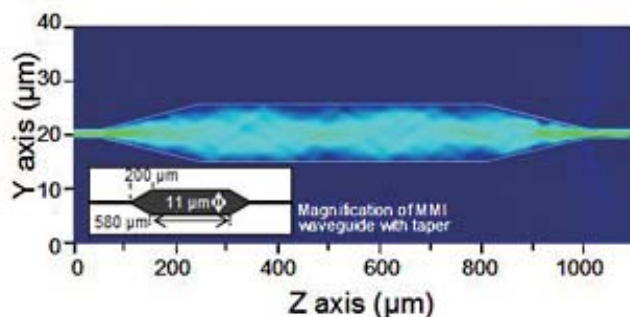


図 15 シングルモード導波路と梁の交差部における光損失と梁の幅の関係 (シミュレーション結果)



(a) taper angle is 180°



(b) taper angle is about 1.4°

図 16 MMI 導波路中に発生する定在波のテーパ形状依存性

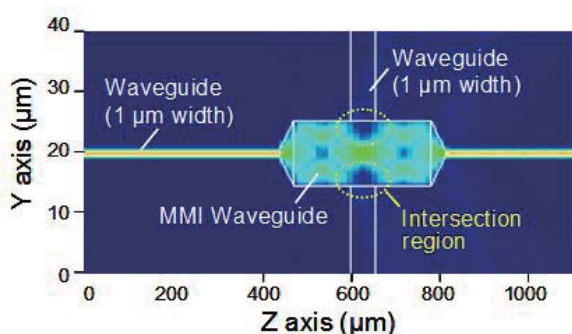


図 17 MMI 導波路中と梁（幅 50μm）を交差させた場合の光強度（シミュレーション結果）

元に、図 14 (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 17 に示すように、幅 50μm 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 18 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 0.3dB 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。

6. 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慣性力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 19 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 2000μm、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 1000μm に、 W_C を 10μm 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 20 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 $9 \times 10^{-8}\text{N}$ （マスとして体積 10^{-13}m^3 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 21 に示す。図 12 に示すように、本研究で提案する MZI 型慣性力センサにおいては、出力を 100% 変調させるためには浮遊導波路を 1.5μm たわませる必要がある。しかしながら、図 21 より、1.5μm たわませる為には幅 5μm の梁であれば長さを約 600μm にする必要であり、非常に長さ / 幅比が大きくなってしまふ。このような梁は機械

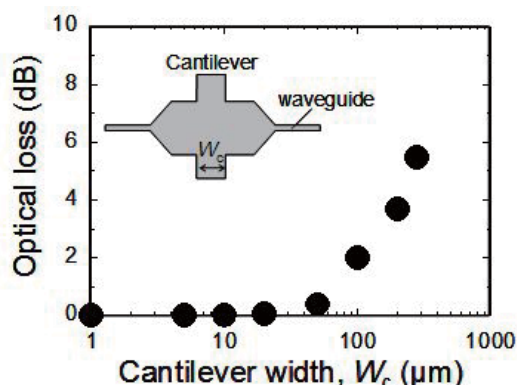


図 18 MMI 導波路と梁の交差部における光損失

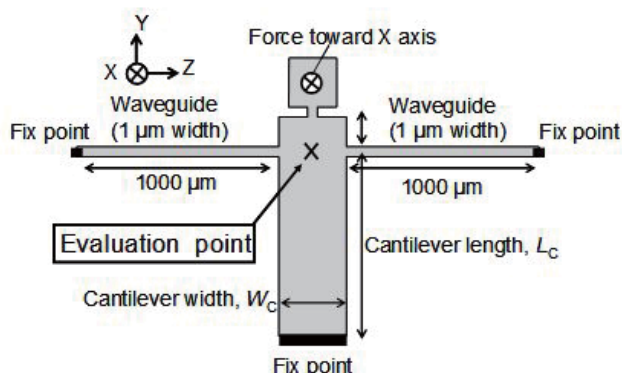


図 19 機械特性シミュレーション対象の上面概略図

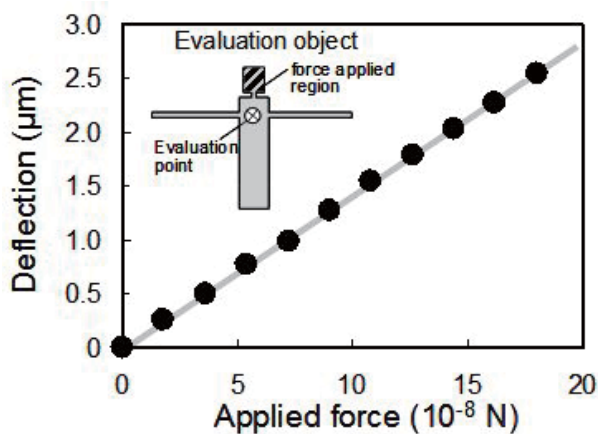


図 20 梁のたわみと印加した力との関係

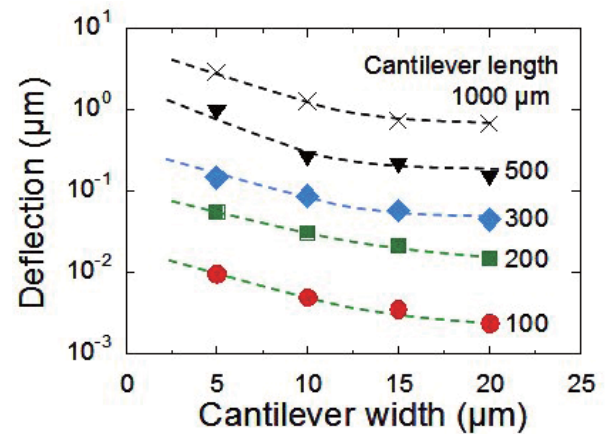


図 21 梁のたわみと梁の幅および長さとの関係

的な破壊耐性が小さい為、破壊を避ける為の更なる工夫が必要であると考えられる。

7. まとめと今後の課題

Si製の光導波路中を伝播する光の干渉を利用した慣性力センサを提案した。また、そのセンサに必要な、光導波路と片持ち梁の最適な平面交差法を検討した。シミュレーションの結果、梁と交差する部分にマルチモード干渉導波路を挿入することが有効であることが確認された。現在、提案デバイスの一部の試作が終了した段階である(図9, 10)。今後は、慣性力センサを完成させ評価していく予定である。

参考文献

- [1] 鈴木昌人, 河合剛, 青柳誠司, 横山新, 福山正隆, "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", 平成21年度電気学会E部門総合研究会, 2009.7, 東京工科大学, 八王子, (口頭発表)
- [2] M. Suzuki, G. Kawai, H. Izumi, S. Aoyagi and S. Yokoyama, "Design and Simulation of Inertial Force Sensor Using Mach-Zehnder Interferometer with Optical Waveguides Made of Crystal Silicon" IEEJ Transaction SM, 129 (2009) pp.301-306.
- [3] N. Yandi, F. Ayazi, and K. Najafi : "Micromachined Inertial Sensors", Proceedings of the IEEE, Vol. 86, pp. 1640-1659 (1998)
- [4] LC. Spangler and CJ. Kemp : "ISACC-Integrated Silicon

Automotive Accelerometer", Proc. Transducers '95, Stockholm, Sweden, pp. 585-588 (1995)

- [5] T. Murakoshi, Y. Endo, K. Fukatsu, S. Nakamura, and M. Esashi : "Electrostatically Levitated Ring-Shaped Rotational-Gyro/Accelerometer", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 42, pp.2468-2472 (2003)
- [6] J. Zhou, S. Dasgupta, H. Kobayashi, J. M. Wolff, H. E. Jackson, and J. T. Boyd : "Optically Interrogated MEMS Pressure Sensors for Propulsion Applications," Optical Engineering, Vol. 40, pp.598-604, (2001)
- [7] J. S. Foresi, P. R. Villeneuve, J. Ferrera, E. R. Thoen, G. Steinmeyer, S. Fan, J. D. Joannopoulos, L. C. Kimerling, Henry I. Smith, and E. P. Ippen : "Photonic-bandgap microcavities in optical waveguides", Nature, Vol. 390, pp. 145-147 (1997)
- [8] B. E. Little, J. S. Foresi, G. Steinmeyer, E. R. Thoen, S. T. Chu, H. A. Haus, Life Fellow, E. P. Ippen, L. C. Kimerling, and W. Greene : "Ultra-Compact Si-SiO₂ Microring Resonator Optical Channel Dropping Filters", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, pp.549-551 (1998)
- [9] M. Ohkawa, M. Izutsu, T. Sueta, "Integrated optic pressure sensor on silicon substrate," Applied Optics, vol. 28, pp.5153-5157 (1989).
- [10] M. Born and E. Wolf : "Principles of Optics 7th Edition" Cambridge University Press, New York, pp.312-315 (1999).

(広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所 福山正隆)