

津波観測に利用可能な高耐圧・高感度 光集積回路圧力センサの開発

(課題番号 | 5360 | 86)

平成15年度～平成16年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))
研究成果報告書

平成17年5月

研究代表者 大河正志

(新潟大学工学部教授)

は し が き

日本列島およびその周辺では、たびたび中規模、大規模地震に見舞われ、多くの人命が失われている。また、世界に目を向けると、毎年のように数百あるいは数千人もの人的被害が報道されている。地震による被害は、地面の直接的な揺れによるものだけでなく、津波によるものも甚大で、その被害は震源から遠く離れたところにも及ぶ。震源が極めて近い場合を除くと、津波の正確な観測ができれば、信頼性の高い津波警報を出して、多くの尊い人命を救うことができる。津波の観測をする場合、海水圧力の変化を高感度に検出できること、さらに海中に設置されるため高圧に耐えられることが重要となる。通常、ダイヤフラム式の圧力センサでは、感度と耐圧には相反する関係があり、一方を高くすると他方が低くなってしまふ。本研究では、高感度と高耐圧の両方を満足し、津波観測に利用可能なダイヤフラム式光集積回路圧力センサを開発することを目的とした。センサの基本構造は、これまで我々のグループが開発してきた光集積回路圧力センサと同じであるが、ダイヤフラム下部に小孔付きの半密閉空間を作りつけるところが異なる。半密閉空間は小孔を介して外界とつながっているため、センサ周囲の圧力に変化がない場合はダイヤフラムの上下面の差圧が0 Paとなり、深海においても水圧でダイヤフラムが壊れることはない。一方、圧力変化が生じたとき、すなわち津波が通過したときは、小孔により圧力変化が半密閉空間に伝わるのが遅れ、ダイヤフラムの上下面の間に圧力差が生じる。この圧力差を検出することにより、センサ周囲の圧力変化を知ることができる。

ところで、本センサのようなダイヤフラム式センサでは、高感度と高耐圧の両立が難しいため、高圧環境で使用できる高感度センサを実現することは困難と考えられてきた。しかし、ここで提案するダイヤフラム式光集積回路圧力センサは、圧力遅延構造を導入することで高感度及び高耐圧を同時に実現できるため、海底に設置することにより津波の観測が可能となる。ただし、このセンサは絶対圧やゲージ圧を測定するのではなく、圧力の時間変化分を測定するもので、通常の圧力センサとは異なる。このアイデアは、市販されているダイヤフラム式圧力センサにも適用可能であるが、光を使うことで、信号伝送路に光ファイバを使用することができる上、漏電対策も不要となり、利点は大きいと考える。また、本センサはダイヤフラムサイズ、小孔の断面積、半密閉空間の体積などの設計自由度が大きく、それぞれの仕様にあわせた設計が可能で、このセンサの大きな利点といえる。このようなセンサが実現され、津波観測システムとして海底に設置されれば、津波を直接かつ常時観測できるようになり、多くの尊い人命を救うことができる。

申請期間内に予定した主な研究課題は、大きく分けると、以下の2点である。

- (a) 圧力遅延構造の遅延特性に関する考察
 - ・遅延部の断面積、長さとの遅延特性に関する理論解析
 - ・実験による遅延特性の確認
- (b) 津波観測用センサの試作およびその特性評価
 - ・(a)の結果に基づくセンサの設計及び試作
 - ・圧力変化検出特性の評価・感度及び耐圧の評価

平成15年度は、センサを試作して、その基本的特性の評価を行った。センサのダイヤフラムサイズは14 mm×14 mm×0.22 mmで、ダイヤフラム下部の半密閉空間の

体積は $14\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 1.8\text{ mm}$ とした。また、小孔の形状は長方形で、その大きさを $93\text{ }\mu\text{m} \times 25\text{ }\mu\text{m}$ とした。測定では、試作センサを $30\text{ cm} \times 28\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ の密閉容器の中に設置し、密閉容器内の圧力をステップ状に 0.78 kPa だけ上昇させた。その結果、圧力変化後 1.4 秒間、センサ出力の変化が観測され、その後再び定常値に戻った。変化が観測された 1.4 秒の間、センサ出力は最大で定常値の約 20% だけ減少した。

平成 16 年度は、前年度に行った理論解析の不十分な点を改善し、出力持続時間が半密閉空間の体積 V と小孔の断面積 A の比 に比例することを明らかにした。さらに、出力持続時間が瞬時圧力変化量の平方根に比例することも見出した。このような理論的知見を検証するため、半密閉空間の体積を一定とし、小孔の断面積と出力持続時間の関係について実験的考察を行った。小孔の形状は円形とし、その直径を $20\text{ }\mu\text{m}$, $25\text{ }\mu\text{m}$, $40\text{ }\mu\text{m}$ の 3 種類とした。測定の結果、直径 $20\text{ }\mu\text{m}$ の場合、持続時間が 1.8 秒（理論値： 0.34 秒）となり、直径 $25\text{ }\mu\text{m}$, $40\text{ }\mu\text{m}$ のものについては、それぞれ 1.8 秒（ 0.22 秒）、 1.9 秒（ 0.08 秒）であった。理論では直径が大きくなるにつれて、持続時間が短くなるが、実験では 3 種類とも約 1.8 秒と違いが見られなかった。これは密閉容器の漏れが原因で、約 2 秒しかステップ状の圧力変化を維持することができなかった。すなわち、約 2 秒後には、密閉用器内の圧力が大気圧に戻ってしまった。より正確な測定のため、ステップ状の圧力印加の実現と漏れをなくすことが不可欠である。

2 年間の研究により、提案した圧力センサが圧力の急変に反応し、出力が現れることが分かった。高耐圧性についてはまだ検証できていないが、試作センサは現在の津波計と同程度の感度を有しており、津波検出の可能性を示すことができた。

キーワード

- (1) 圧力センサ (2) 光集積回路 (3) ガラス導波路
(4) ダイヤフラム

研究組織

研究代表者： 大河正志（新潟大学工学部教授）

研究分担者： 佐藤 孝（新潟大学工学部教授）

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成15年度	4,500	0	4,500
平成16年度	1,500	0	1,500
総計	6,000	0	6,000

研究発表

(1) 学会誌等

1. Yoshisumi Endo, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: "Guided-wave optical pressure sensor responding only to changing pressure," Proceedings of SPIE, Vol. **5728** (2005).
2. Hiroyuki Nikkuni, Shuuichi Dokko, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: "An optical microphone using a silicon-based guided-wave optical pressure sensor," Proceedings of SPIE, Vol. **5728** (2005).

(2) 口頭発表

1. 獨古修一，時田亨，大河正志，関根征士，佐藤孝：“シリコン基板光集積回路圧力センサを用いたカテーテル先端型圧センサプロトタイプの実成，” 2003年度電子情報通信学会信越支部大会，講演番号 J2, pp. 201-202 (2003).
2. 岡本裕美，大河正志，関根征士，佐藤孝：“リモートセンシング用光集積回路圧力センサに関する基礎研究，” 2003年度電子情報通信学会信越支部大会，講演番号 J3, pp. 203-204 (2003).
3. Yoshisumi Endo, Masashi Ohkawa, Seishi Sekine, and Takashi Sato: "Guided-wave optical pressure sensor with sensitivity for sudden pressure change only," 2004 International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, P-140 (2004).
4. 遠藤義純，大河正志，関根征士，佐藤孝：“瞬時圧力変化に感度を有する光導波型圧力センサ，” 2004年度電子情報通信学会信越支部大会，講演番号 3D-2, pp. 113-114 (2004).
5. 新國広幸，獨古修一，大河正志，関根征士，佐藤孝：“シリコン基板光導波型圧力センサを用いた光マイクロホン，” 2004年度電子情報通信学会信越支部大会，講演番号 4C-1, pp. 139-140 (2004).

目 次

第1章 序論	1
第2章 センサの構成および動作原理	3
2-1 従来型光集積回路圧力センサの構成および動作原理	3
2-2 高耐圧・高感度光集積回路圧力センサの構成および動作原理	5
第3章 光集積回路圧力センサの理論特性	6
3-1 従来型光集積回路圧力センサ	6
3-1-1 動作解析法	8
3-1-2 理論特性	8
3-1-2-1 センサ感度の導波路位置依存性	8
3-1-2-2 センサ感度のダイヤフラム厚依存性	9
3-1-2-3 センサ感度のダイヤフラム面積依存性	10
3-2 高耐圧・高感度光集積回路圧力センサ	11
3-2-1 半密閉空間における圧力変化の理論解析	11
3-2-2 理論特性	14
第4章 高耐圧・高感度光集積回路圧力センサの実証実験	16
4-1 センサの設計	16
4-2 センサの作製	16
4-3 測定光学系	17
4-4 測定結果	18
4-4-1 矩形小孔の場合	18
4-4-2 円形小孔の場合	19
4-5 考察	22
第5章 結論	24
付 録 センサの作製工程	25
参考文献	28
研究発表論文等	31
関連論文	41

第1章 序論

日本列島およびその周辺では、たびたび中規模、大規模地震に見舞われ、多くの人命が失われている。また、世界に目を向けると、毎年のように数百あるいは数千人もの人的被害が報道されている。地震による被害は、地面の直接的な揺れによるものだけでなく、津波によるものも甚大で、その被害は震源から遠く離れたところにも及ぶ。震源が極めて近い場合を除くと、津波の正確な観測ができれば、信頼性の高い津波警報を出して、多くの尊い人命を救うことができる。津波の観測をする場合、海水圧力の変化を高感度に検出できること、さらに海中に設置されるため高圧に耐えられることが重要となる。通常、ダイヤフラム式の圧力センサでは、感度と耐圧には相反する関係があり、一方を高くすると他方が低くなってしまふ。本研究では、高感度と高耐圧の両方を満足し、津波観測に利用可能なダイヤフラム式光集積回路圧力センサを開発することを目的とした。

ところで、光集積回路センサは、ミラー、ビームスプリッタなどの光学素子を同一基板上に集積化し、センサ機能を持たせたデバイスで、小型・軽量、光軸合わせ不要、高安定性、高感度などの特徴が期待される。1981年のL. M. Johnsonらによる温度センサ^[1]の報告以来、圧力センサ^[2-5]、変位センサ^[6]、速度センサ^[7]、湿度センサ^[8]、水素センサ^[9]など様々な光集積回路センサが考案され、実証実験が行われてきた。また、マイクロマシン技術の進歩により、機械的構造と光集積回路を組み合わせた機械量センサ（圧力センサ、加速度センサなど）が注目され^[2-5, 10]、1989年のM. Ohkawaらによる光集積回路圧力センサの報告^[2]以来活発に開発が進められている。我々の研究グループにおいても、これまでシリコン基板やガラス基板を用いたダイヤフラム式光集積回路センサの開発を精力的に行ってきた。^[11-17] 本研究で対象とする高耐圧・高感度光集積回路圧力センサの基本構造は、これまで我々のグループが開発してきた光集積回路圧力センサと同じであるが、ダイヤフラムを密閉し、小孔あるいは細管状の圧力伝播遅延部を作りつけるところが異なる^[18, 19]。ダイヤフラム密閉部は圧力遅延部を介してセンサ外部とつながっているため、センサ周囲の圧力変化がない場合はダイヤフラムの上下面の差圧が0 Paとなり、深海においても水圧でダイヤフラムが壊れることはない。一方、圧力変化が生じたとき、すなわち津波が通過したときは、圧力遅延部により圧力変化がダイヤフラム密閉部に伝わるのが遅れ、ダイヤフラムの上下面の間に圧力差が生じる。この圧力差を検出することにより津波による海水圧の変化を知ることができる。ただし、このセンサは絶対圧やゲージ圧を測定するのではなく、圧力変化を測定するもので、通常の圧力センサ^[2-5, 11-17]とは特性が異なる。

本研究では、圧力遅延構造として小孔を取り上げ、その圧力遅延特性について、理論と実験の両面から考察を行った。理論では、流体として空気を仮定し、小孔の断面積、圧力遅延構造部の容積と圧力遅延時間の関係を調べた。

ところで、本センサの構成は、市販されているダイヤフラム式圧力センサにも適用可能であるが、光波を使うことで、信号伝送路に光ファイバを使用することができる上、漏電対策も不要となり、津波観測用センサとして有利であると言える。また、本センサはダイヤフラムや圧力遅延部のサイズなどの設計自由度が大きく、それぞれの仕様にあわせた設計が可能である。このようなセンサが実現され、津波観測システムとして海底に設置されれば、津波を直接かつ常時観測できるようになり、多くの尊い人命を救うことができるものと期待される。

第2章 センサの構成および動作原理

2-1 従来型光集積回路圧力センサの構成および動作原理

Figure 2-1 は従来型のガラス基板光集積回路圧力センサの概略図である。^[14,17] 図のように、センサは感圧部となるダイヤフラムと単一モード直線光導波路で構成される。この光導波路はダイヤフラム上に設けられ、最低次の TM-like, TE-like モード光のみを伝搬させる。

ダイヤフラムに圧力が印加されると、ダイヤフラムにたわみが起こり、歪みが生じる。歪みは、光弾性効果により、ダイヤフラム上の光導波路に屈折率変化を引き起こす。この屈折率変化により、光導波路を伝搬する TM-like, TE-like モード光の位相が変化する。ここで、圧力印加によりダイヤフラムに生じる歪み分布は等方的ではないため、歪みによって生じる屈折率変化も等方的ではない。そのため、TM-like, TE-like モード光の受ける位相変化量が異なり、両モード光の間に位相差が生じる。この誘起位相差を検出するため、Fig. 2-2 のようにセンサを偏光子と検光子の間に置く。偏光子の偏光方向をセンサ基板面に対して 45° 傾けることにより、両モード光を等強度で励振させる。励起された TM-like, TE-like モード光は、それぞれ異なる位相変化量 $\Delta\phi_{\text{TM}}$, $\Delta\phi_{\text{TE}}$ を受けるため、圧力印加時には両モード間で位相差 $\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{TM}} - \Delta\phi_{\text{TE}}$ が生じる。この位相差に応じて、出力端での偏光状態は直線、楕円、円偏光のいずれかとなる。検光子の偏光方向を入射光の偏光方向に対し 90° 傾けることにより、位相差に応じた出力光強度変化が得られる。この場合、出力光強度は印加圧力に対して正弦的に変化する。

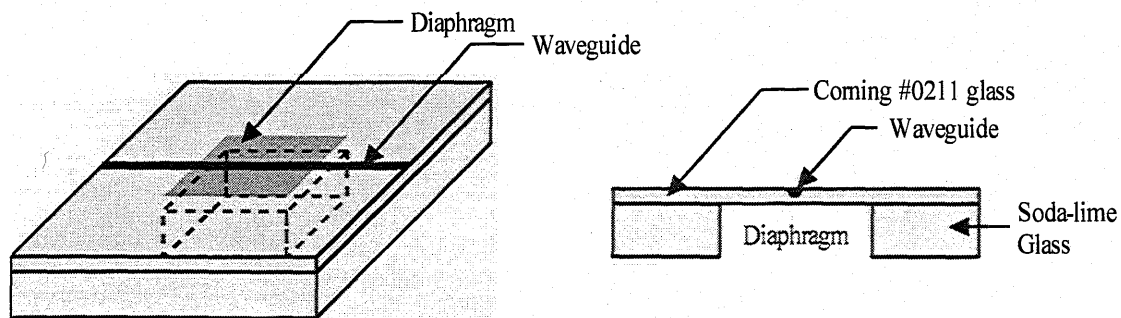


Fig. 2-1 (a) Schematic drawing of the conventional glass-based integrated optic pressure sensor using intermodal interference, and (b) its cross-sectional view.

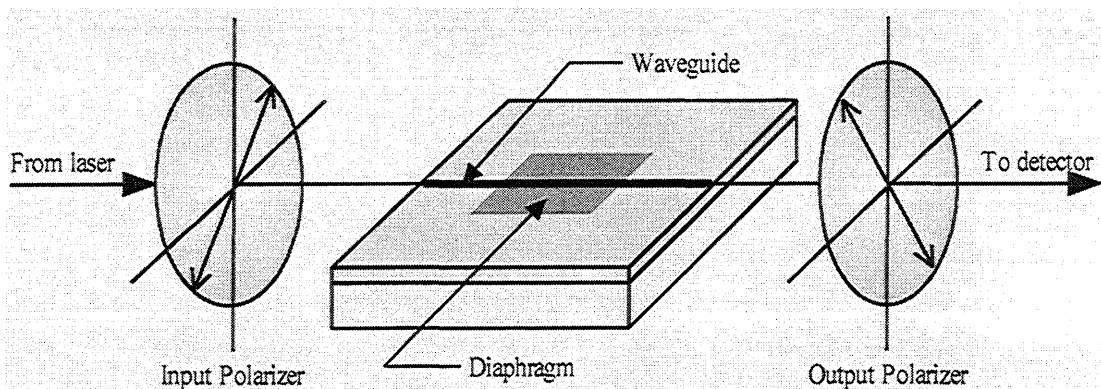


Fig. 2-2 The sensor placed between a pair of crossed polarizers to convert the phase difference between the two guided modes into the change in the light intensity.

最大出力光強度を1に正規化すると、センサの印加圧力-出力光強度特性は Fig. 2-3 のようになる。出力光強度変化は周期的で1周期の半分を半波長圧力と呼び、感度や測定可能範囲の指標となる。また、半波長圧力は位相差 π radに相当し、 π radを半波長圧力で割った値、すなわち圧力1 kPaにおける誘起位相差を位相感度と呼ぶ。本研究では、位相感度をセンサ感度としてセンサの特性評価に使用する。

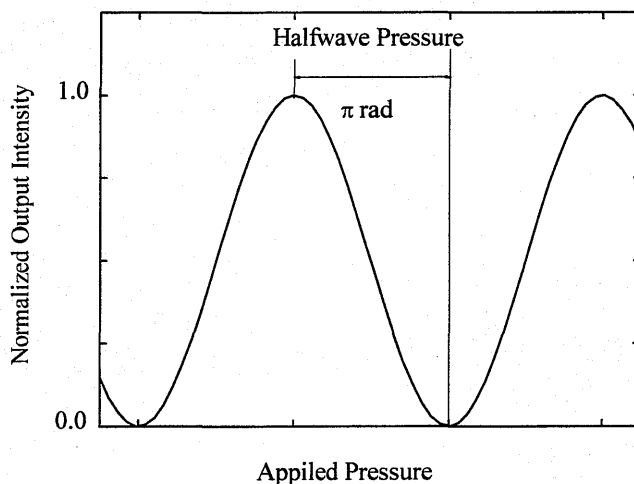


Fig. 2-3 Relationship between normalized output intensity and applied pressure

2-2 高耐圧・高感度光集積回路圧力センサの構成および動作原理

Figure 2-1 のセンサにおいて、高感度のものを得るためには、ダイヤフラム面積を大きくするか、厚さを薄くしなければならず、いずれにしても耐圧は低くなる。一方、高耐圧のものを得るためには、ダイヤフラム面積を小さくするか、厚さを厚くしなければならず、感度が犠牲となる。つまり、Fig. 2-1 のような従来型圧力センサでは、高耐圧と高感度を同時に実現することは困難と言える。そこで、本研究では、高耐圧と高感度を同時に実現するため、従来型センサの下面に小孔付基板を取り付け、ダイヤフラムの下側を半密閉空間とした。Fig. 2-4 は高耐圧・高感度光集積回路圧力センサの概略図である。センサの半密閉空間は小孔（圧力伝播遅延構造）を通してセンサ外部と繋がっているため、Fig. 2-4 のセンサを静圧下に置いたときは、センサ周囲圧力と半密閉空間の圧力は等しい。したがって、静圧下では、ダイヤフラムに圧力差は生じない。しかしながら、センサ周囲圧力が急変したときは、小孔が圧力差に伴う流体の移動を妨げるので、半密閉空間の圧力はセンサ周囲圧力に追従することができない。この追従の遅れが、短時間ではあるが、ダイヤフラム上に圧力差が生じる。つまり、このセンサは、従来のセンサと異なり、圧力の大きさに応答するのではなく、圧力変化に対して応答を示す。なお、誘起圧力差の検出原理は、2-1 節で述べた測定原理と全く同じであるので、省略する。

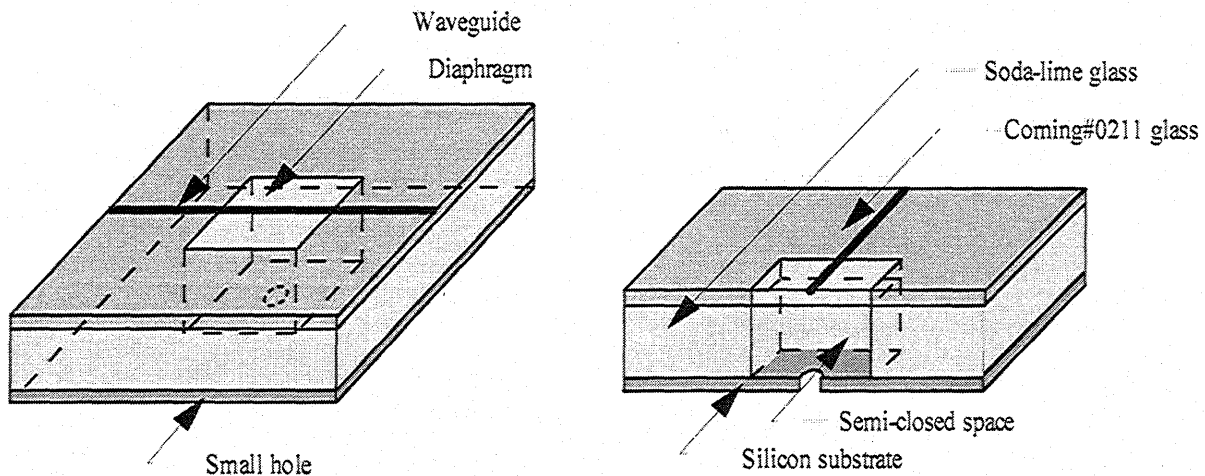


Fig. 2-4 (a) Schematic drawing of a guided-wave optical pressure sensor using intermodal interference. The sensor shows a response only to sudden pressure change by a semi-closed space with a small hole. (b) The cross-sectional view of the sensor.

第3章 光集積回路圧力センサの理論特性

3-1 従来型光集積回路圧力センサ

3-1-1 動作解析法

従来型光集積回路圧力センサは、高耐圧・高感度光集積回路圧力センサのベースとなっており、圧力検出特性はダイヤフラムサイズや導波路位置等に依存する。そこで、これらの依存性を理論的に明らかにするために数値解析を行った。解析では、四辺が固定された矩形ダイヤフラムを仮定し、面積を $a \times b$ 、厚さを t とした。 y - z 平面をダイヤフラムの上面と下面の中間にとり、 x 軸をダイヤフラム表面に対して垂直な方向とした。ここで、ダイヤフラムの辺 a は y 軸に平行で、辺 b は z 軸に平行であるとした。また、光導波路は z 軸（辺 b ）と平行に作りつけられるものとした。

ところで、ダイヤフラムに圧力が印加されると、ダイヤフラムにたわみが生じる。このたわみ w は次式で表される平板の平衡方程式から求められる。^[20]

$$\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} = \frac{q}{D} \quad (3-1)$$

ここで、 q はダイヤフラムに働く圧力、 D は曲げ剛性を表し、

$$D = \frac{Yt^3}{12(1-\rho)} \quad (3-2)$$

と定義される。ただし、 Y はヤング率、 ρ はポアソン比を表す。上述の条件における式(3-1)の解、すなわちたわみ w は次式のような和の形で与えられる。^[18]

$$w = w_0 + w_1 + w_2 \quad (3-3)$$

それぞれのたわみ w_0 , w_1 , w_2 は、

$$w_0 = \frac{4qa^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^5} \left(1 - \frac{\alpha_m \tanh \alpha_m + 2}{2 \cosh \alpha_m} \cosh \frac{m\pi z}{a} + \frac{1}{2 \cosh \alpha_m} \frac{m\pi z}{a} \sinh \frac{m\pi z}{a} \right) \cos \frac{m\pi y}{a} \quad (3-4)$$

$$w_1 = -\frac{a^2}{2\pi^2 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} E_m \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^2 \cosh \alpha_m} \left(\frac{m\pi z}{a} \sinh \frac{m\pi z}{a} - \alpha_m \tanh \alpha_m \cosh \frac{m\pi z}{a} \right) \cos \frac{m\pi y}{a} \quad (3-5)$$

$$w_2 = -\frac{b^2}{2\pi^2 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} F_m \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^2 \cosh \beta_m} \left(\frac{m\pi y}{b} \sinh \frac{m\pi y}{b} - \beta_m \tanh \beta_m \cosh \frac{m\pi y}{b} \right) \cos \frac{m\pi z}{b} \quad (3-6)$$

と表せる。ただし、 $\alpha_m = m\pi b/2a$ 、 $\beta_m = m\pi a/2b$ である。また、式中の E_m と F_m は、固定端の条件（ダイヤフラム面の傾きが0）から、次の2つの境界条件を満たすように決定される。

$$\left(\frac{\partial w_0}{\partial z}\right)_{z=b/2} + \left(\frac{\partial w_1}{\partial z} + \frac{\partial w_2}{\partial z}\right)_{z=b/2} = 0 \quad (3-7)$$

$$\left(\frac{\partial w_0}{\partial y}\right)_{y=a/2} + \left(\frac{\partial w_1}{\partial y} + \frac{\partial w_2}{\partial y}\right)_{y=a/2} = 0 \quad (3-8)$$

このようにして求めたたわみ w を使って、ダイヤフラムに生じる応力は以下のように表される。

$$\sigma_x = T_1 = -\frac{3q}{4} \left\{ \frac{2}{3} - \frac{2}{t}x + \frac{1}{3} \left(\frac{2}{t}x \right)^3 \right\} \quad (3-9)$$

$$\sigma_y = T_2 = -\frac{Yx}{1-\rho^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \rho \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3-10)$$

$$\sigma_z = T_3 = -\frac{Yx}{1-\rho^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \rho \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (3-11)$$

応力はテンソル量で、 T_1 , T_2 , T_3 はそれぞれ x , y , z 方向の垂直応力を表す。この応力 T と歪み S の間にフックの法則が成り立つとすれば、歪みはコンプライアンス s_{ij} を用いて

$$S_i = s_{ij} T_j, \quad (i, j=1-6) \quad (3-12)$$

と表せる。歪みによって引き起こされる屈折率変化 Δn_i は、光弾性係数 p_{ij} を用いて、次のように与えられる。

$$\Delta n_i = -\frac{1}{2} n^3 p_{ij} S_j, \quad (i, j=1-6) \quad (3-13)$$

ところで、屈折率変化の各成分は導波光に与える効果が異なる。 Δn_1 は TM-like モード光の位相変化を引き起こし、 Δn_2 は TE-like モード光の位相変化を生じさせる。これらの屈折率変化によって TM-like, TE-like モード光が受ける位相変化量 $\Delta\phi_{\text{TM}}$, $\Delta\phi_{\text{TE}}$ は、それぞれ次式により計算できる。^[21]

$$\Delta\phi_{\text{TM}} \approx \int_{-b/2}^{b/2} \left(\frac{\omega\epsilon_0 n}{2} \int_{a/2}^{a/2} \int_{-t/2}^{t/2} E_x(x, y) \Delta n_1(x, y, z) E_x^*(x, y) dx dy \right) dz \quad (3-14)$$

$$\Delta\phi_{\text{TE}} = \int_{-b/2}^{b/2} \left(\frac{\omega\epsilon_0 n}{2} \int_{a/2}^{a/2} \int_{-t/2}^{t/2} E_y(x, y) \Delta n_2(x, y, z) E_y^*(x, y) dx dy \right) dz \quad (3-15)$$

ここで ω は光の角周波数、 ϵ_0 は真空の誘電率であり、* は複素共役を表す。また、 E_x , E_y はそれぞれ TM-like モード光の x 方向の電界成分、TE-like モード光の y 方向の電界成分である。これより、ダイヤフラム上で両モード光に生じる位相差 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{TM}} - \Delta\phi_{\text{TE}} \quad (3-16)$$

で与えられる。

3-1-2 理論特性

3-1-2-1 センサ感度の導波路位置依存性

圧力印加時におけるダイヤフラムのたわみ方は場所によって異なるため、各部分に生じる歪みは一様でない。したがって、位相感度はダイヤフラム上の導波路位置によって異なる。そこで、導波路位置の関数として位相感度を計算した。Figure 3-1はその計算結果で、ダイヤフラムの辺の比をパラメータとして3種類の結果を示している。各結果とも、導波路がダイヤフラムの端に位置するとき、位相感度がそれぞれ1となるように正規化してある。図において、導波路位置 $\pm a/2$ はダイヤフラムの端に、導波路位置0はダイヤフラム中央に対応する。図より、導波路がダイヤフラムの端に位置するとき、位相感度が最も高くなっている。しかし、導波路位置が端から少しずれると、位相感度が大きく低下することも分かる。一方、ダイヤフラム中央においても、辺の比 a/b が1以上のときには、比較的大きな位相感度となっている。また、導波路位置が中央から少しずれても、位相感度は大きく変化しない。つまり、大きなセンサ感度を必要とするときには、導波路をダイヤフラムの端に設置するのが適当と言える。また、導波路の位置ずれの影響を嫌う場合には、ダイヤフラム中央に導波路を設置するのが有利である。

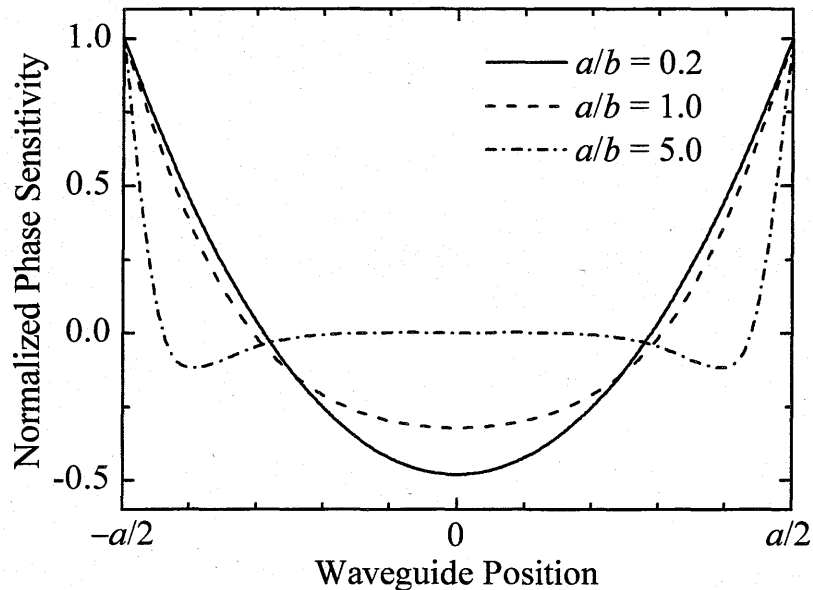


Fig. 3-1 Normalized phase sensitivity as a function of waveguide position.

なお、数値計算で使用した材料力学定数、光学定数の値は以下のとおりである。

使用した材料力学定数（溶融石英）

$$Y = 7.31 \times 10^{10} \text{ Pa}^{-1}, \quad \rho = 0.17 \quad (3-17)$$

$$s_{ij} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{pmatrix} \quad (3-18)$$

$$s_{11} = 1.37 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}, \quad s_{12} = -2.33 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}, \quad s_{44} = 3.20 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$$

使用した光学定数

$$n = 1.53 \quad (3-19)$$

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{pmatrix} \quad (3-20)$$

$$p_{11} = 1.21 \times 10^{-1}, \quad p_{12} = 2.70 \times 10^{-1}, \quad p_{44} = 7.45 \times 10^{-2}$$

3-1-2-2 センサ感度のダイヤフラム厚依存性

ダイヤフラムの辺の比と面積を一定とし、位相感度をダイヤフラム厚の関数として計算した。計算では、ダイヤフラムの辺の比を $a/b=0.2$ とし、光導波路はダイヤフラムの辺 b 上 ($y=\pm a/2$) に位置するものとした。Figure 3-2 は計算結果で、ダイヤフラム厚が $10 \mu\text{m}$ のとき、位相感度が 1 となるように正規化してある。Figure 3-2 より、ダイヤフラム厚が導波層の厚さ（計算では $1.0 \mu\text{m}$ と仮定）よりも十分厚いとき、両対数グラフにおいて傾きが 2 であるので、位相感度はダイヤフラム厚の 2 乗に反比例することが分かる。ダイヤフラム厚が $1.5 \mu\text{m}$ 以下のときには位相感度が減少しているが、これは式(3-14)、(3-15)に示した電界分布と屈折率変化分布との間の重なり積分が小さくなるためである。ダイヤフラム厚を薄くすると耐圧も減少するので、実際のセンサでは、そこまでダイヤフラムを薄くする必要はないと言える。なお、このような関係は、任意の辺の比、任意の導波路位置で成り立つ。

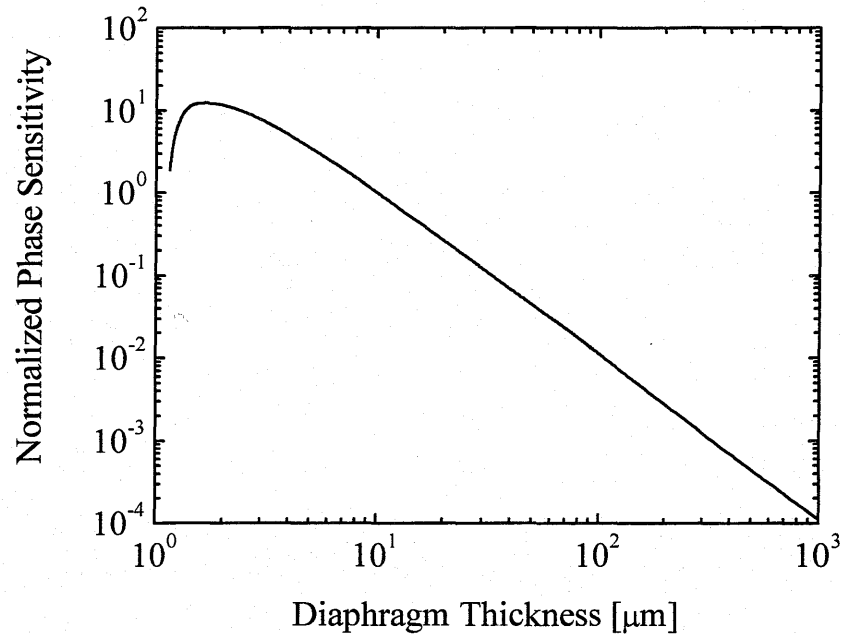


Fig. 3-2 Normalized phase sensitivity as a function of thickness of diaphragm.

3-1-2-3 センサ感度のダイヤフラム面積依存性

ダイヤフラムの辺の比と厚さを一定とし、位相感度をダイヤフラムの辺 a の関数として計算した。計算では、ダイヤフラムの辺の比を $a/b=0.2$ とし、光導波路はダイヤフラムの辺 b 上 ($y=\pm a/2$) に位置するものとした。Figure 3-3 はその計算結果である。ただし、ダイヤフラムの辺 a の長さが 1 mm のとき、位相感度が 1 となるように正規化してある。Figure 3-3 より、両対数グラフにおいて傾きが 3 であるので、位相感度はダイヤフラムの辺 a の 3 乗に比例することが分かる。なお、このような関係は、任意の辺の比、任意の導波路位置で成り立つ。

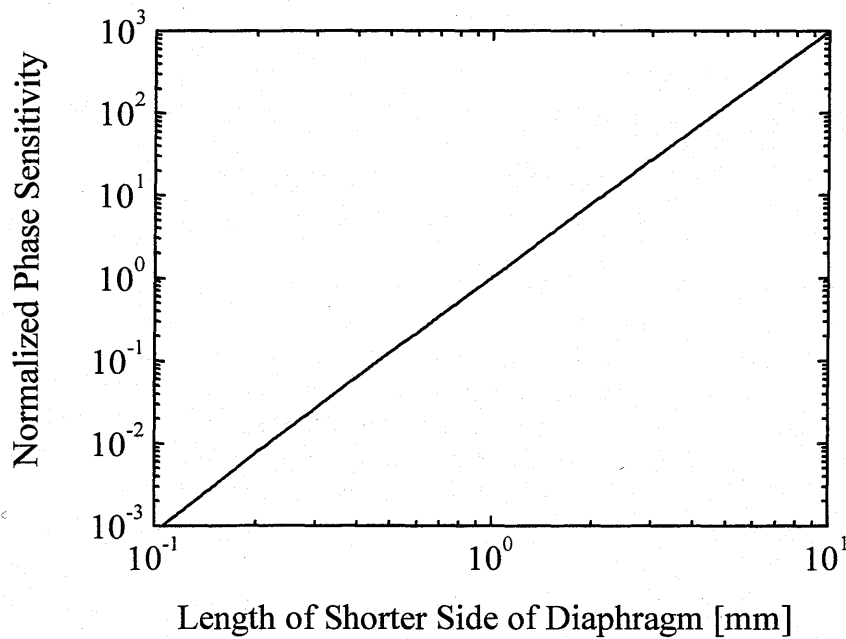


Fig. 3-3 Normalized phase sensitivity as a function of length of shorter side of diaphragm.

3-2 高耐圧・高感度光集積回路圧力センサ

3-2-1 半密閉空間における圧力変化の理論解析

本研究で提案する高耐圧・高感度光集積回路圧力センサにおいて、瞬時圧力変化が与えられたときの圧力遅延時間（ダイヤフラムにおける圧力差誘起時間）は、非常に重要なセンサ特性の一つである。Figure 3-4 はセンサ周囲圧力に瞬時変化が与えられたときの誘起圧力差 $\Delta p(t)$ を導くための各変数を示している。 V は半密閉空間の体積、 A は小孔の面積を表す。また、センサ周囲圧力の変化前には、センサ周囲圧力と半密閉空間内圧力共に p_0 であったとする。この状態からセンサ周囲圧力を p_a に瞬時に変化させたとき、半密閉空間の圧力は p_0 のままであり、このときのダイヤフラムに生じる圧力差の初期値を Δp_0 とすると、 $p_0 = p_a - \Delta p_0$ が成り立つ。瞬時圧力変化後は、小孔を通して流体の出入りがあるため、半密閉空間の圧力は徐々に変化し、最終的にはセンサ周囲圧力に等しくなる。ここで、半密閉空間の圧力の時間変化を表す関数を $p(t)$ とすると、ダイヤフラムに生じる圧力差は $\Delta p(t) = p_a - p(t)$ と書ける。ところで、瞬時圧力変化が生じた時間を $t=0$ とすると、その時刻での半密閉空間の圧力は $p(0) = p_0$ で、ダイヤフラムに生じる圧力差は $\Delta p(0) = \Delta p_0$ となる。

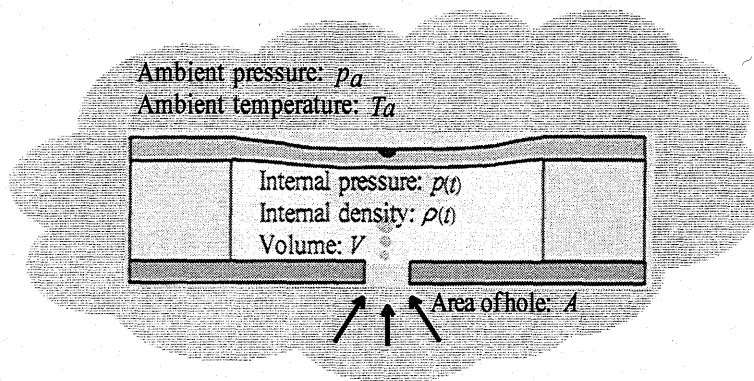


Fig. 3-4 Schematic diagram mathematically showing how the sensor obtains the induced pressure difference and its duration. In the model, the volume of the semi-closed space is V , and the sectional area of the small hole is A . The pressure and temperature in the surroundings just after the sudden pressure change are p_a and T_a , respectively. The pressure and density in the semi-closed space are $p(t)$ and $\rho(t)$, respectively.

圧縮性流体に対するベルヌーイの定理から、小孔を通過する質量流量は次式で与えられる。

$$\dot{m} = \frac{p_a A}{\sqrt{RT_a}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{p(t)}{p_a} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p(t)}{p_a} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} = \frac{p_a A}{\sqrt{RT_a}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left(1 - \frac{\Delta p(t)}{p_a} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(1 - \frac{\Delta p(t)}{p_a} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad (3-21)$$

ここで、 R はガス定数で、 γ は比熱を表す。流体として空気を仮定すると、 γ の値は1.403である。誘起圧力差 $\Delta p(t)$ がセンサ周囲圧力 p_a に比べて十分に小さければ、式(3-21)は近似的に

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{2p_a}{RT_a}} A \sqrt{\Delta p(t)} \quad (3-22)$$

と書ける。ところで、断熱変化の仮定の下では、

$$\frac{p(t)}{p_0} = \left(\frac{\rho(t)}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (3-23)$$

が成り立つ。ここで、 $\rho(t)$ は半密閉空間における流体密度の時間変化を表し、 ρ_0 は時刻 $t=0$ における $\rho(t)$ の初期値を表す。式(3-23)と $\rho(t) = \rho_0 + \Delta\rho(t)$ から、 $\Delta\rho(t)$ が ρ_0 より十分に小さければ、ダイヤフラムに生じる圧力差は、簡単な近似により、

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 - \gamma \frac{p_0}{\rho_0} \Delta\rho(t) \quad (3-24)$$

と書ける。式(3-24)を式(3-21)に代入すると、質量流量は、

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{2p_a}{RT_a}} A \sqrt{\Delta p_0 - \gamma \frac{p_0}{\rho_0} \Delta \rho(t)} \quad (3-25)$$

となる。ところで、質量保存の法則から、微小時間 dt の間に半密閉空間に流入した流体の質量 $\dot{m}dt$ は、半密閉空間内で増加した流体の質量 $Vd\rho$ と等しくなければならない。したがって、

$$\dot{m}dt = Vd\rho = Vd(\Delta\rho) \quad (3-26)$$

が成り立たなければならない。式(3-25)を式(3-26)の左辺に代入すると、

$$\sqrt{\frac{2p_a}{RT_a}} \frac{A}{V} dt = \frac{1}{\sqrt{\Delta p_0 - \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \Delta \rho}} d(\Delta\rho) \quad (3-27)$$

となる。式(3-27)の左辺を t に関して 0 から t まで定積分し、右辺を $\Delta\rho$ に関して 0 から $\Delta\rho$ まで定積分すると、

$$\sqrt{\frac{2p_a}{RT_a}} \frac{A}{V} t = 2 \frac{\rho_0}{\gamma p_0} \left(\sqrt{\Delta p_0} - \sqrt{\Delta p(t)} \right) \quad (3-28)$$

が得られる。式(3-28)は

$$\sqrt{\Delta p(t)} = \sqrt{\Delta p_0} - \sqrt{\frac{p_a}{2RT_a} \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \frac{A}{V} t} \quad (3-29)$$

と書き換えることができる。なお、式(3-29)が成り立つのは、右辺の値が正の間で、このときダイヤフラムに圧力差が生じる。したがって、圧力差誘起時間は、

$$t = \sqrt{\frac{2RT_a}{p_a} \frac{\rho_0}{\gamma p_0} \frac{V}{A} \sqrt{\Delta p_0}} \quad (3-30)$$

で与えられる。式(3-30)から、圧力差誘起時間は V/A 比（半密閉空間の体積と小孔の断面積の比）に比例し、また初期圧力差の平方根にも比例することが分かる。圧力差誘起時間内において、誘起圧力差の時間変化は、

$$\Delta p(t) = \left(\sqrt{\Delta p_0} - \sqrt{\frac{p_a}{2RT_a} \frac{\gamma p_0}{\rho_0} \frac{A}{V} t} \right)^2 \quad (3-31)$$

と表せる。

3-2-2 理論特性

ここでは、常温常圧の大気中にセンサを設置するものと仮定し、センサ周囲温度 $T_a = 300.0 \text{ K}$, $\gamma = 1.403$, ガス定数 $R = 287.1 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, 半密閉空間の初期圧力 $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, 密度 $\rho_0 = 1.293 \text{ kg/m}^3$ を式(3.30)に代入する。Figure 3-5 はその計算結果で、 V/A 比（半密閉空間体積と小孔面積の比）と圧力差誘起時間の関係を表す。Figure 3-5 では、瞬時圧力変化量 Δp_0 をパラメータとし、 5 kPa , 1 kPa , 0.1 kPa の場合の結果を示している。Figure 3-5 から圧力差誘起時間は V/A 比に比例することが分かる。また、同じ V/A 比であっても、瞬時圧力変化量が大きくなれば、圧力差誘起時間は長くなる。式(10)によると、誘起時間は瞬時圧力変化量の平方根に比例する。

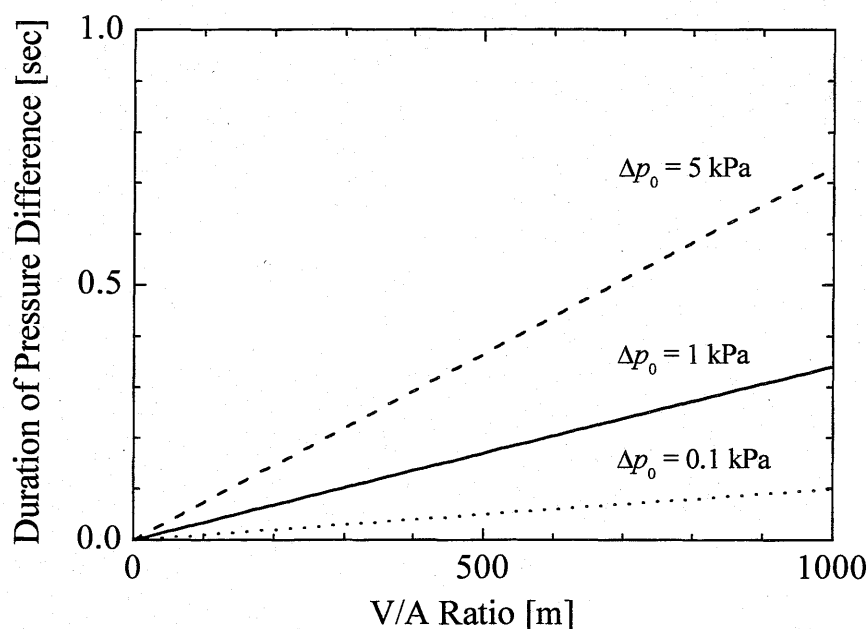


Fig. 3-5 Duration of the induced pressure difference as a function of the V/A ratio. In the figure, the initial pressure difference is taken as a parameter.

次に、小孔の直径を $20 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$ とし、瞬時圧力変化量 Δp_0 を 1 kPa としたときの誘起圧力差の時間変化を式(3-31)を使って計算した。断面積 A はそれぞれ $314.2 \mu\text{m}^2$, $490.9 \mu\text{m}^2$, $1257 \mu\text{m}^2$ である。ここでは半密閉空間の体積 V を $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$ としたので、 V/A 比はそれぞれ 1123 m (直径 $20 \mu\text{m}$), 718.7 m (直径 $25 \mu\text{m}$), 280.7 m (直径 $40 \mu\text{m}$) となる。Figure 3-6 は計算結果で、実線はセンサ周囲圧力を表し、ここではセンサ周囲圧力がステップ状に変化するものと仮定した。また、点線は各小孔直径における誘起圧力差の時間変化を表している。なお、図では、縦軸の印加圧力及び誘起圧力差は共に瞬時圧力変化量 Δp_0 で割って、正規化している。Figure 3-6 及び式(3-31)より、誘起圧力差 $\Delta p(t)$ は二次関数的に減少し、最終的に 0 kPa , すなわちセンサ周囲圧力と半密閉空間圧力が等しくなる。ちなみに、圧力差誘起時間の理論値

は、小孔直径が 20 μm の時は約 0.38 sec, 25 μm の時は約 0.25 sec, 40 μm の時は約 0.10 sec となる。

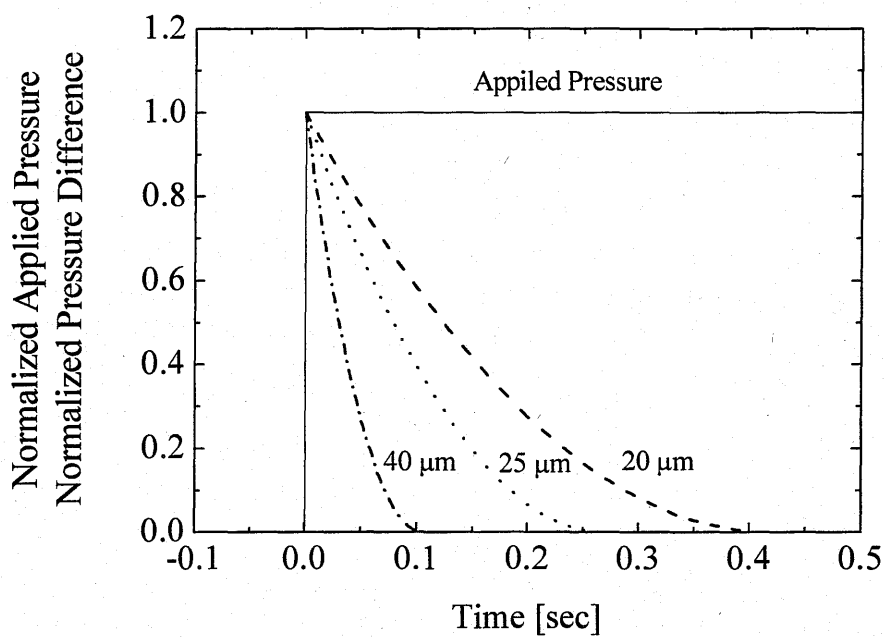


Fig. 3-6 Normalized pressure difference $\Delta p(t)/\Delta p_0$ induced on the diaphragm as a function of time; diameter of the small hole is taken as a parameter. In the figure, the solid line represents the ambient pressure change.

第4章 高耐圧・高感度光集積回路圧力センサの実証実験

4-1 センサの設計

高耐圧・高感度光集積回路圧力センサの基本的動作を確認するため、センサの設計・試作を行った。津波検出を目的としていることから、津波により生じる圧力変化をセンサ周囲圧力として想定すべきであるが、ここでは、動作確認のしやすさに重点をおき、センサ周囲圧力の変化量を1 kPa前後に設定した。ちなみに、この圧力変化は、海水面の高さに換算すると、10 cm程度の変化に相当する。

センサの設計では、センサの感度あるいは半波長圧力が重要な特性値となり、第3章でも述べたようにダイヤフラムサイズ、導波路位置等で決まる。まず、センサ周囲圧力変化を1 kPa前後と設定したことから、圧力センサの半波長圧力は1 kPa以上でなければならない。また、感度の面からはあまり大きな半波長圧力は望ましくない。本研究では、センサの半波長圧力を35 kPa前後に設定し、ダイヤフラムサイズを14 mm×14 mm×0.22 mmとした。次に、圧力差誘起時間の設定であるが、センサ周囲圧力を長時間大気圧より高い状態あるいは低い状態に維持しておくのは困難であると考え、ここでは、1秒以下の誘起時間になるよう、半密閉空間の設計を行った。そこで、半密閉空間の体積を14 mm×14 mm×1.8 mmとし、小孔の断面積を314.5~2325 μm^2 とした。このような設定により想定される圧力差誘起時間は0.046~0.38秒となる。

ところで、センサ周囲圧力を変化させるためには、センサ及び入出射用対物レンズを密閉容器に設置する必要がある。ここでは、30 cm×28 cm×30 cmの密閉容器を自作することとし、密閉容器をシリコンチューブで注射器に接続して、注射器の内筒を押し引きすることで、密閉用器内の圧力、すなわちセンサ周囲圧力を変化させることにした。

4-2 センサの作製

本研究では、ダイヤフラムを用いた従来型光集積回路圧力センサを作った後、センサ下部に小孔付基板を接着することで、高耐圧・高感度光集積回路圧力センサを作製することとした。従来型センサの作製には、2枚のガラス基板：(1) コーニング#0211ガラス（ダイヤフラムとなる導波路作製用基板）、(2) 穴あきソーダライムガラス（ダイヤフラム支持基板）を使用した。穴あきガラスの穴の形状は正方形で、大きさは14 mm×14 mmである。

コーニングガラス上にアルミニウム薄膜を真空蒸着でつけ、さらにアルミニウム薄膜上にフォトレジストをスピニングした。導波路パターンが描かれたフォトマスクを使って、フォトレジストを露光し、フォトレジスト上に導波路パターンを転写した。さらに、このフォトレジストをマスクとして、アルミニウム薄膜をエッチングし、導波路パターンをアルミニウム薄膜に転写した。フォトレジストを除去した後、400 °Cの硝酸カリウムに浸し、イオン交換法で単一モード導波路を作製した。導波路作製後、作製した導波路がダイヤフラム支持基板の穴の縁に沿うように位置合わせし、2枚のガラス基板を重ね合わせた。なお、本研究では等間隔で多数の導波路を作製し

ており、その内の1本を位置合わせ用に用いた。位置合わせ後、紫外線硬化樹脂を注入し、紫外線を照射して2枚のガラスを接着した。以上が、従来型センサの作製工程の概略である。

次に、小孔付基板を圧力センサに接着して、ダイヤフラム下部に半密閉空間を作製した。本研究では、小孔として矩形と円形の2種類のものを使用した。矩形の小孔については、シリコンを基板とし、シリコンの異方性エッチングにより作製した。また、円形の小孔については、市販されている光学用ピンホールをアクリル板に接着して、小孔付基板を作製した。なお、試作センサのダイヤフラムの寸法及び半密閉空間の体積は、小孔の形状に関係なく、それぞれ $14\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ 、 $14\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 1.8\text{ mm}$ であった。また、小孔の断面積については、矩形のものは $2325\text{ }\mu\text{m}^2$ 、円形のものは $314.2\text{ }\mu\text{m}^2$ 、 $490.9\text{ }\mu\text{m}^2$ 、 $1257\text{ }\mu\text{m}^2$ であった。

4-3 測定光学系

Figure 4-1 はセンサ周囲圧力の変化による出力光強度を測定するための光学系である。試作センサ、端面結合用対物レンズ及び結像用対物レンズを体積 $30\text{ cm} \times 28\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ の密閉空間内に設置した。基本的な構成は Fig. 2-2 と同じであるが、図における入射用偏光子の代わりに、レーザの偏光方向をセンサ基板面に対して 45° 傾けた。また、ピンホールは導波光以外の背景光を除去するために使用した。

密閉空間内の圧力すなわちセンサ周囲圧力を変化させるため、密閉空間にはシリコンチューブを介して注射器をつなげた。実験では、注射器の内筒を押すことにより、密閉空間の圧力（センサ周囲圧力）を 0.78 kPa だけ瞬時に上昇させた。

光強度の測定には、パワーメータを使用し、そのアナログ出力を AD 変換ボードに入力してコンピュータに記録した。AD 変換ボードのサンプリング時間は 10 msec とした。

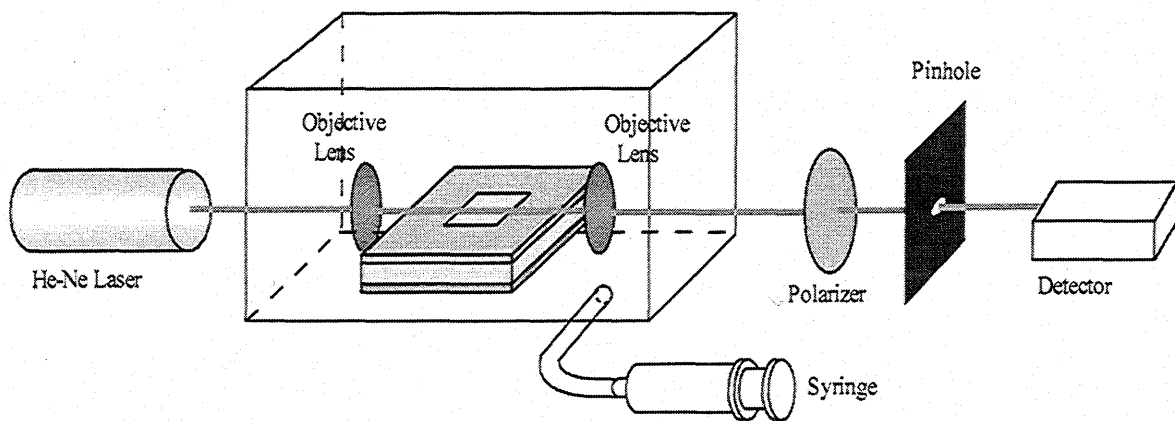


Fig. 4-1 Experimental setup to measure output intensity as a function of applied pressure. A sensor and two objective lenses were put in a closed box.

4-4 測定結果

4-4-1 矩形小孔の場合

Figure 4-2 は矩形小孔付試作センサの上面図及び断面図である。ダイヤフラムの面積は $14\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ で、その厚さは 0.22 mm である。また、半密閉空間の体積は $14\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 1.8\text{ mm}$ で、小孔の断面積は $93\text{ }\mu\text{m} \times 25\text{ }\mu\text{m}$ ($2325\text{ }\mu\text{m}^2$) である。

Figure 4-3 に測定結果を示す。サンプリング開始後約 15 sec の時点で、試作センサが入った密閉空間の圧力を 0.78 kPa だけ急激に上昇させた。なお、この圧力変化 0.78 kPa は実測値ではなく、注射器容量の変化量から計算した値である。密閉空間の圧力、すなわちセンサ周囲圧力の変化に伴い、出力光強度が、定常時の強度レベル ($0.38\text{ }\mu\text{W}$) に比べて、約 20% だけ減少した。ステップ状の圧力変化後約 1.4 sec で、出力光強度は定常時の強度レベルに戻った。したがって、圧力差誘起時間は約 1.4 sec であることが分かった。しかし、理論計算によると圧力差誘起時間は 0.046 sec であり、理論結果と実験結果には大きく食い違いがある。このような大きな相違は、小孔における圧力損失や流体摩擦によって生じたものと考えている。

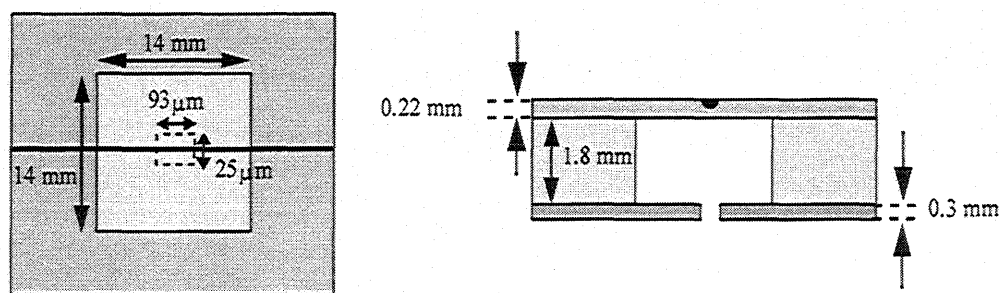


Fig. 4-2 Top and cross-sectional views of the fabricated sensor and actual dimensions.

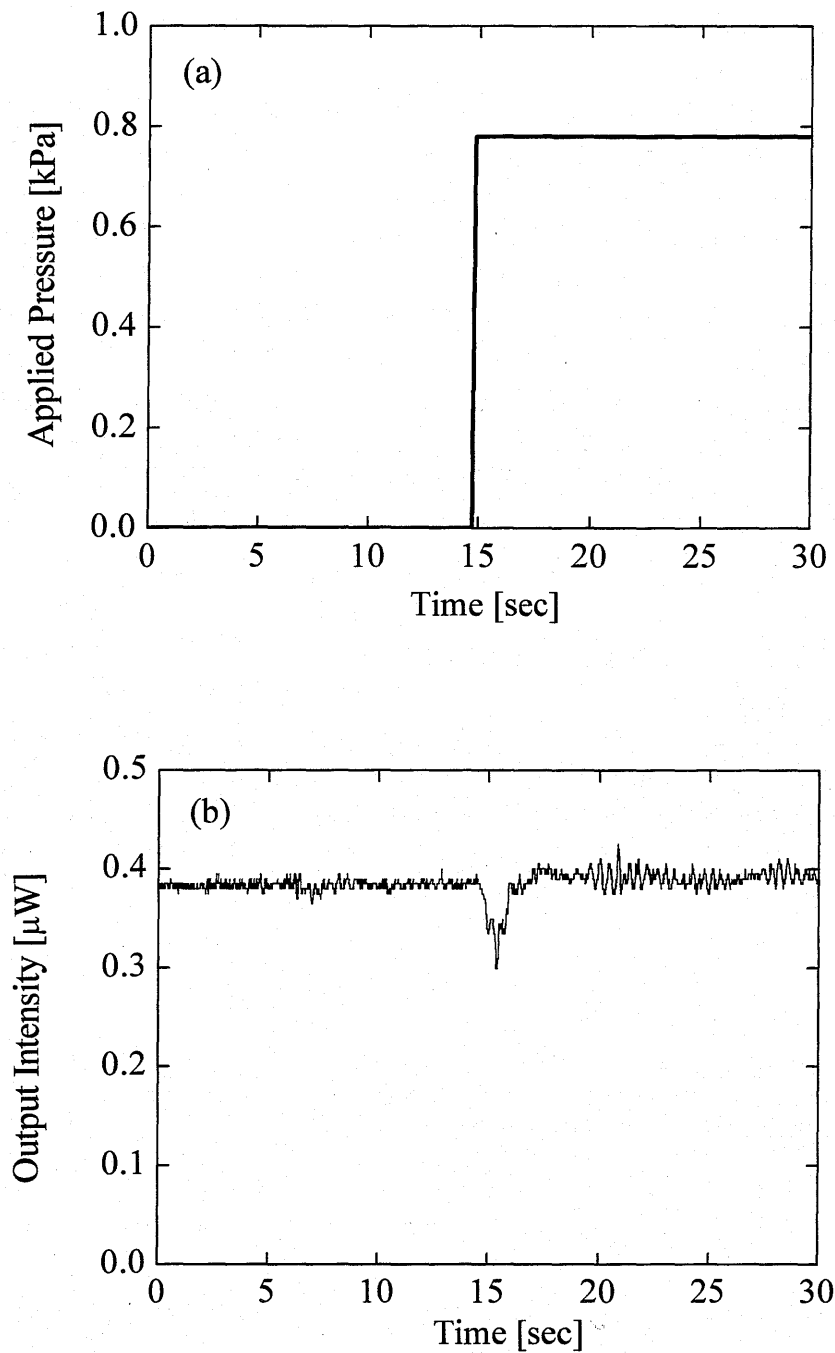


Fig. 4-3 (a) Ambient pressure change was increased by 0.78 kPa in a stepwise fashion at about 15 sec. (b) Measured output intensity as a function of time.

4-4-2 円形小孔の場合

4-4-1項と同様に、ダイヤフラムサイズを $14\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 0.22\text{ mm}$ とし、半密閉空間の体積を $14\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 1.8\text{ mm}$ とした。小孔に関しては、異方性エッチングによる作製の精度が悪く、特性評価に支障が出ると予想されたため、ここでは光学実

験用のピンホールを使用することとした。なお、小孔（ピンホール）の直径は 20 μm , 25 μm , 40 μm の 3 種類とした。ちなみに、小孔直径を 20 μm , 25 μm , 40 μm としたときの圧力差誘起時間（理論値）は 3-3-2 項で述べたように、それぞれ 0.38 sec, 0.25 sec, 0.10 sec である。

Figure 4-4 は、圧力計を用いて、測定空間に加えた圧力を測定した結果である。横軸は経過時間で、縦軸は AD 変換ボードでパソコンに取り込んだ圧力センサの出力である。AD 変換のサンプリング間隔は 10msec で、サンプリング時間は 30 sec とした。サンプリングを開始してから約 16 sec 後に加圧を行った。その結果、測定空間内の圧力が最大になるのは約 0.5~0.8 sec 後で、その後約 1.2~1.3 sec 後に加圧を行う前の圧力に戻った。また、印加圧力の最大値は約 0.75 kPa であった。これより、印加圧力は 2 sec 程度しか維持できないことが分かった。2 sec という維持時間は非常に短く、決して十分とは言えないが、小孔直径 20 μm , 25 μm , 40 μm の圧力差誘起時間は 0.5 sec 以下であると予測され、特性評価実験に支障はないものと考えた。

Figures 4-5, 4-6, 4-7 はそれぞれ小孔直径 20 μm , 25 μm , 40 μm の測定結果で、縦軸は AD 変換ボードを介してパソコンに取り込んだ光検出器の出力、すなわちセンサ出力である。なお、AD 変換のサンプリング間隔は 10 msec で、サンプリング時間は 30 秒とした。測定の結果、圧力印加に伴うセンサ出力の変化が確認された。出力光強度の変化の割合は、小孔直径 20 μm のセンサの場合、圧力印加前の光強度に対して約 55% の減少、小孔直径 25 μm , 40 μm のセンサの場合は約 50% の減少であった。これは、瞬時圧力変化によって、一時的な誘起圧力差が生じたことを示している。Table 4-1 は小孔の直径（面積）と圧力差誘起時間の理論値及び測定値の関係である。理論式から小孔の断面積に反比例して圧力差誘起時間が短くなることが予想されたが、測定値は小孔直径にかかわらず約 1.8 sec であった。この原因については次節で考察する。

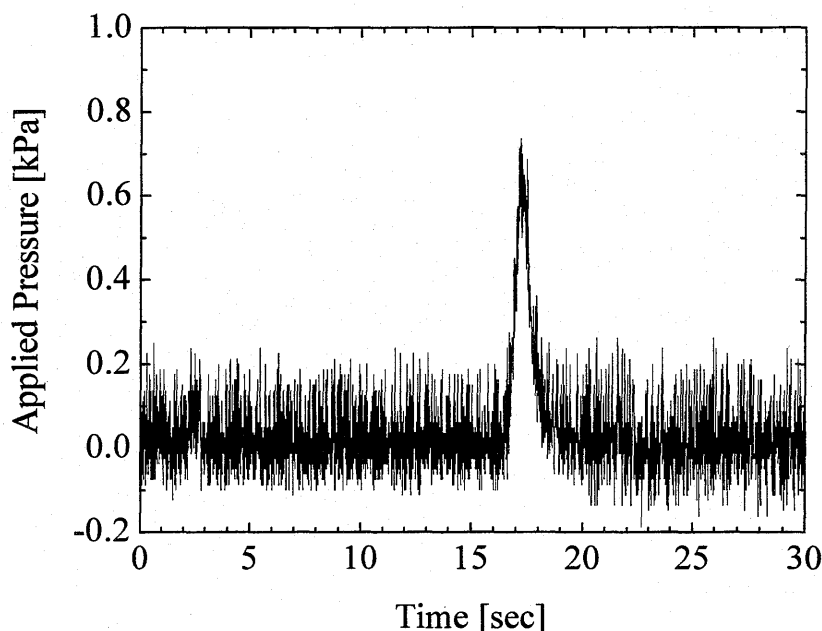


Fig. 4-4 Measured pressure change of the closed box when pushing the plunger of a syringe.

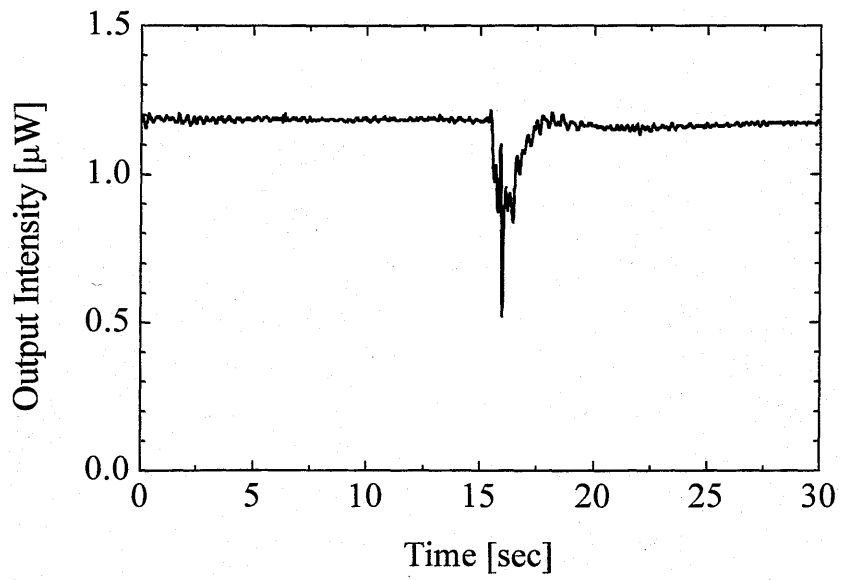


Fig. 4-5 Measure output intensity in a small hole radius of $20\ \mu\text{m}$.

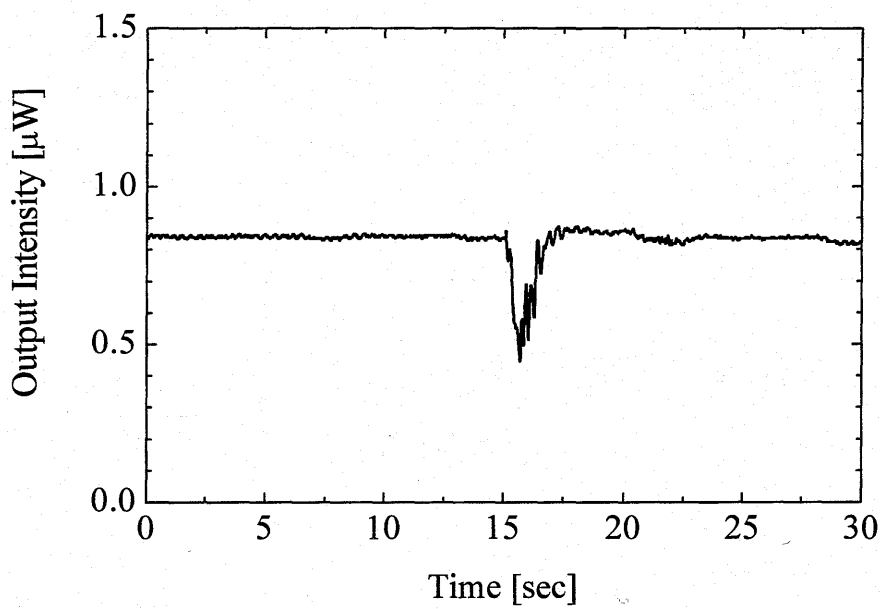


Fig. 4-6 Measure output intensity in a small hole radius of $25\ \mu\text{m}$.

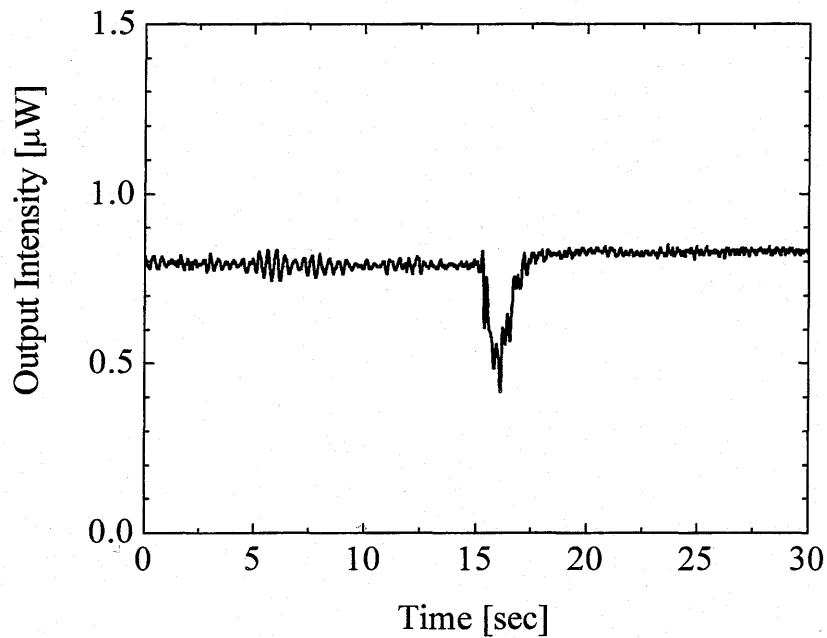


Fig. 4-7 Measure output intensity in a small hole radius of 40 μm .

Table 4-1 Calculated and measured durations of the induced pressure difference on the diaphragm.

Diameter(Area)	Calculated Duration	Measured Duration
20 μm (314 μm^2)	0.34 sec	1.8 sec
25 μm (492 μm^2)	0.22 sec	1.8 sec
40 μm (1256 μm^2)	0.08 sec	1.9 sec

4-5 考察

小孔の形状を矩形及び円形とし、ステップ状の圧力変化を与えて、経過時間—出力光強度変化を調べた。矩形小孔の場合は、4-4-1項で述べたように、圧力差誘起時間の測定値は1.4 secで、理論値の0.046 secに比べて、大きな値となった。また、円形小孔の場合も、Table 4-1のように測定値が計算値より大きな値となった。このような大きな相違は、小孔における圧力損失や流体摩擦によって生じたものと考えている。また、測定空間の印加圧力が2 sec程度しか維持できなかったため、測定値が1.4 sec～1.9 secに制限されたものと考えられる。そのため、測定空間の印加圧力を長い時間維持できたとしたら、より長い圧力差誘起時間が得られた可能性もある。

一方、出力光強度（センサ出力）の変化に関しては、センサ周囲圧力の変化量とセンサ感度によって決まる。センサ周囲圧力の変化量は、圧力センサによる測定の結果、約 0.75 kPa であった。センサ感度については、半密閉空間を取り除いた圧力センサを試作し、その感度を調べた。圧力センサのダイヤフラムサイズは 4-4-1 項、4-4-2 項のセンサと同じ 14 mm×14 mm×0.22 mm とした。Figure 4-8 は圧力センサの印加圧力-出力光強度特性である。圧力センサの感度は、3-1-2-1 項で述べたとおり、導波路位置に依存する。ちなみに、Fig. 4-8 の結果はダイヤフラム中央の導波路における結果である。図より、出力光強度は印加圧力に対して正弦的な変化しており、半波長圧力は 35.0 kPa で、位相感度は 89.7 mrad/kPa と算出された。したがって、0.75 kPa の圧力変化の場合、67.3 mrad の位相変化が引き起こされると推測され、実験で得られた 20%~55% の光強度変化は妥当な変化と言える。ただし、Figs. 4-5~4-7 のセンサにおける初期位相の大きさが分からなかったため、残念ながら光強度変化に関する正確な考察を行うことはできなかった。

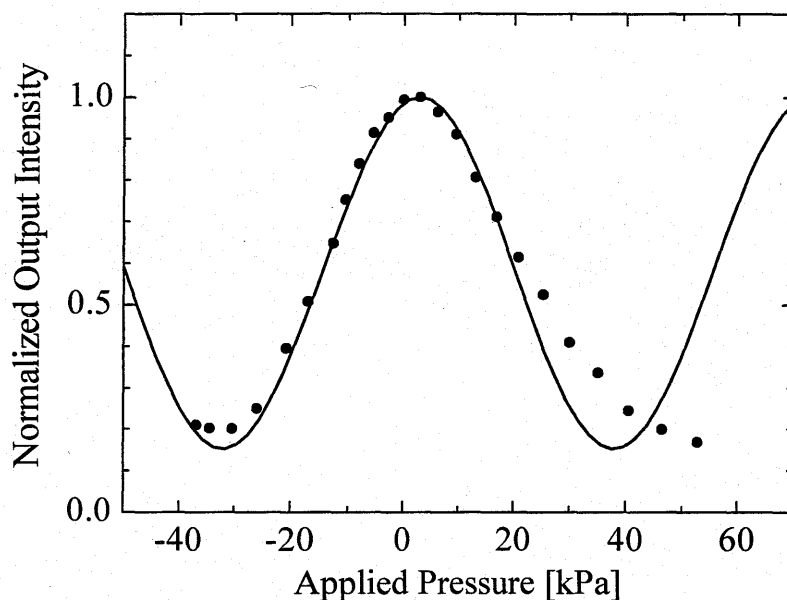


Fig. 4-8 Normalized output intensity versus applied pressure for the waveguide nearest to the center of the diaphragm.

第6章 結論

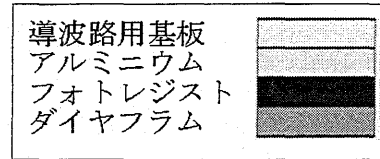
本研究では、津波観測に利用可能な高耐圧・高感度光集積回路センサの開発を行った。圧力センサを海底に設置して津波観測を行う場合、水圧に耐え、津波による微小な圧力変化を検出することが必要である。しかし、従来型のダイヤフラム式光集積回路圧力センサでは、一般に高感度と高耐圧を両立することは困難である。そこで、本研究では、ダイヤフラム下部に小孔（圧力遅延構造）付半密閉空間を設けたセンサを考案し、そのセンサ特性について考察した。本センサは、通常の圧力センサと異なり、圧力変化が生じたときにのみ、出力変化が現れる。つまり、静圧あるいは圧力変化が緩やかな場合は出力変化が現れず、圧力が変化した場合にのみ出力変化が現れる。津波観測の状況に対応させると、通常の波浪の周期は数 sec 程度と変化が緩やかであるためセンサは応答しないが、津波による圧力変化は急激に起こるため、センサ出力に変化が現れ、波浪と津波の海面変化を区別することができる。なお、出力変化が生じる時間は、半密閉空間の体積及び小孔サイズによって決まる。

本研究では、まず、基本的なセンサ動作を確認するため、圧力遅延構造を上述のとおり小孔とし、流体を空気とした。空気は圧縮性流体で、海水とは性質が異なるが、センサ動作の確認においては特に問題はないと考えた。実験では、試作センサのダイヤフラムサイズを $14\text{mm} \times 14\text{mm} \times 0.22\text{mm}$ とし、小孔の断面積を $2325\ \mu\text{m}^2$ （矩形）、 $314.2\ \mu\text{m}^2$ 、 $490.9\ \mu\text{m}^2$ 、 $1257\ \mu\text{m}^2$ （円形）とした。このような試作センサを $30\text{cm} \times 28\text{cm} \times 30\text{cm}$ の密閉空間の中に固定し、その密閉空間に $0.7\sim 0.8\ \text{kPa}$ の圧力を加え、出力光強度の時間変化の特性評価を行った。測定の結果、圧力印加直後に出力光強度が $20\sim 55\%$ 程度減少し、また圧力差誘起時間は $1.4\sim 1.9\ \text{sec}$ であった。圧力差誘起時間の測定値は理論値に比べて一桁程度長く、小孔の断面積との関係はほとんど見られなかった。誘起時間が長くなった原因として、小孔での圧力損失や摩擦により、流体に対する抵抗が大きくなったためと考えている。さらに、圧力差誘起時間が小孔面積にほとんど依存しなかった原因は、測定空間の圧力変化を約 $2\ \text{sec}$ 程度しか維持できなかったためである。そのため、圧力差誘起時間は今回の測定値よりもさらに長い可能性がある。理論値との定量的な相違は残っているが、基本的なセンサ動作を確認することができた。

今後引き続きセンサ開発を進め、圧力差誘起時間と小孔面積、半密閉空間の体積の関係性を明らかにする予定である。さらに、海水においても動作可能なセンサ構造について検討し、センサを水中に設置した状態で基本的動作の確認を行う予定である。感度に関しては、津波を検知できる目処は立っており、近い将来、実用化を目指した研究に移行できるものと考えている。

付録 センサの作製工程

光導波路及びセンサの作製工程を以下に示す。



(1) Al 真空蒸着

ガラス(Corning#0211)基板上にアルミニウム薄膜を真空蒸着する。



(1) Al 真空蒸着

(2) フォトレジスト塗布

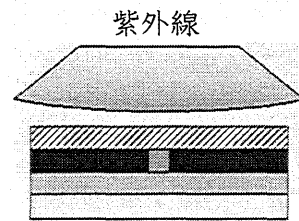
スピナーを用いてフォトレジストを基板上に塗布する。なお、本研究ではフォトレジストに Shipley 社 S1813 を使用した。スピナーコーティングの条件は、(1)1000rpm, 5 秒間, (2) 4000rpm, 15 秒間の 2 段階とした。塗布後, 80 °C で 30 分間プリベイクを行った。



(2) フォトレジスト塗布

(3) 露光

光導波路用マスクを使って導波路パターンをフォトレジスト上に密着露光する。露光時間は 10 秒とした。



(3) 露光

(4) 現像

露光した基板を現像液(現像液：イオン交換水=1：1)に 40 秒間浸し, その後イオン交換水でリンスする。



(4) 現像

(5) Al エッチング

パターニングされたフォトレジストをマスクとして, Al のエッチングを行う。本研究では, Al エッチング液 (リン酸：硝酸：酢酸：イオン交換水=16：1：2：1) を使用した。



(5) Al エッチング

(6) フォトレジスト除去

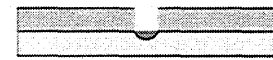
基板をアセトンに浸し、フォトレジストを除去する。



(6) フォトレジスト除去

(7) イオン交換

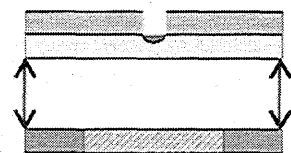
ガラスの屈折率は組成イオンの単位面積当たりの電子分極率によって決まるので、組成を変えることによってその屈折率を制御できる。通常、ガラスは SiO_2 や B_2O_3 などのガラス形成酸化物中に Na_2O , K_2O , CaO などの修飾酸化物が点在している構造を持っている。高温中では、この修飾酸化物はイオン化し、例えば SiO_2 の網目構造の中を動き回る。したがって、ガラスをある温度以上に熱し、外部から別のイオンをガラス内部へ拡散させ、内部の Na^+ イオンなどと置き換えることができる。これを熱イオン交換という。この方法で簡単に低損失のガラス薄膜導波路を得ることができる。すなわち、適当な一価の金属イオンを含む中性塩を用意し、これを融点以上に加熱して溶かし、この中に導波路用ガラス基板を一定時間浸す。これによって、ガラス表面近くで Na^+ イオンが一価の金属イオンに置換され高屈折率層が形成される。中性塩として AgNO_3 (融点 208°C)、 KNO_3 (融点 339°C)、 TlNO_3 (融点 230°C)がよく用いられる。このとき、 Tl^+ 、 Ag^+ イオン交換では大きな屈折率変化が得られる代わりに導波路は多モード化しやすい。一方、 K^+ イオン交換は単一モード導波路の作製に適している。本研究では中性塩に KNO_3 を用いることとし、基板を 400°C の KNO_3 溶液に2時間浸し、単一モード導波路を作製した。



(7) イオン交換

(8) ダイアフラム用基板との接着

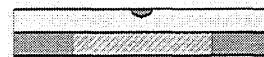
導波路とダイアフラム支持基板の穴の縁が一致するように位置合わせし、2枚のガラス（導波路基板とダイアフラム支持基板）を紫外線硬化樹脂で接着する。本研究では紫外線照射時間を3時間とした。



(8) ダイアフラム用基板との接着

(9) Al 除去

基板を Al エッチング液に浸し、アルミニウム薄膜を除去する。



(9) Al 除去

(10) 端面研磨

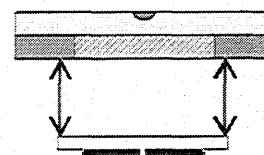
端面結合法により導波光を励起するため、センサ両端面の垂直研磨を行う。ここまでの工程で、従来型光集積回路圧力センサができ上がる。



(10) 端面研磨

(11) 小孔付基板との接着

従来型光集積回路圧力センサと小孔付基板を紫外線硬化樹脂で接着する。紫外線照射時間は3時間とした。



(11) 小孔付基板との接着

参 考 文 献

1. L. M. Johnson, G. W. Pratt, and F. J. Leonberger, "Integrated-optical temperature sensor," in *Technical Digest, Third International Conference on Integrated and Optical Fiber Communication* (Optical Society of America, Washinton, DC, 1981), paper WL4.
2. M. Ohkawa, M. Izutsu, and T. Sueta, "Integrated optic pressure sensor on silicon substrate," *Appl. Opt.*, **28**, 5153-5157 (1989).
3. G. N. De Brabander, Glenn Beheim, and J. T. Boyd, "Integrated optical micromachined pressure sensor with spectrally encoded output and temperature compensation," *Appl. Opt.*, **37**, 3264-3267 (1998).
4. H. Porte, V. Gorel, S. Kiryenko, J. Goedgebuer, W. Daniau, and P. Blind, "Imbalanced Mach-Zehnder interferometer integrated in micromachined silicon substrate for pressure sensor," *J. Lightwave Technol.*, **17**, 229-233 (1999).
5. G. N. De Brabander, J. T. Boyd, and G. Beheim, "Integrated optical ring resonator with micromechanical diaphragm for pressure sensing," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6**, 671-673 (1994).
6. M. Izutsu, A. Enokihara, and T. Sueta, "Optical-waveguide microdisplacement sensor," *Electron. Lett.*, **18**, 867-868 (1982).
7. H. Toda, K. Kasazumi, M. Haruna, and H. Nishihara, "An optical integrated circuit for time-division 2-D velocity measurement," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-7**, 364-367 (1989).
8. A. Enokihara, M. Izutsu, and T. Sueta, "Integrated-optic fluid sensor using heat transfer," *Appl. Opt.*, **27**, 109-113 (1988).
9. K. Nishizawa et al., "High sensitivity waveguide-type hydrogen sensor," *Proc. Optical Fiber Conference*, 131-134 (1986).
10. M. Tabib-Azar, and G. Beheim, "Modern trends in microstructures and integrated optics for communication, sensing, and actuation," *Opt. Eng.*, **36**, 1307-1318 (1997).
11. Y. Shirai, T. Goto, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Silicon-based integrated optical pressure sensor using intermodal interference between TM-like and TE-like modes," *Proc. SPIE*, **4277**, 411-418 (2001).
12. A. Yamada, Y. Shirai, T. Goto, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Relationship between sensitivity and waveguide position on diaphragm for silicon-based integrated optic pressure sensor," in *Technical Digest Volume-I, CLEO/Pacific Rim 2001*, 420-421 (2001).
13. M. Ohkawa, Y. Shirai, T. Goto, S. Sekine, and T. Sato, "Silicon-based integrated optic sensor using intermodal interference between TM-like and TE-like modes," *Fiber and Integrated Optics*, **21**, 105-113 (2002).
14. M. Ohkawa, K. Hasebe, S. Sekine, and T. Sato, "Relationship between sensitivity and waveguide position on the diaphragm in integrated optic pressure sensors based on the elasto-optic effect," *Appl. Opt.*, **41**, 5016-5021 (2002).
15. M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Silicon-based integrated optic sensor using intermodal interference between fundamental TM-like and TE-like modes," *Recent Research Developments in Electronics and Communications Part-I*, **1**, 137-148 (2002).
16. A. Yamada, T. Tokita, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Scale reduction rule for diaphragm dimensions to miniaturize a silicon-based integrated optic pressure sensor without reducing sensitivity," *Proc. SPIE*, **4987** (2003).
17. Y. Iwase, Y. Okamoto, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Sensitivity dependence with

- respect to diaphragm dimensions in a glass based integrated optic pressure sensor,” Proc. SPIE, **4987** (2003).
18. Y. Endo, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, “Guided-wave optical pressure sensor with sensitivity for sudden pressure change only,” in *Abstract Booklet of the 2004 International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies*, p. 228, Niigata, June 7-10 (2005).
 19. Y. Endo, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, “Guided-wave optical pressure sensor responding only to changing pressure,” Proc. SPIE, **5728**, pp. 309-316 (2005).
 20. S. Timoshenko, and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells* (McGraw Hill, New York, 1981).
 21. M. Izutsu, and T. Sueta, “Coupled mode analysis of light modulation in dielectric waveguides,” Appl. Phys., **5**, 307-315 (1975).

研究発表論文等

- (1) Y. Endo, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Guided-wave optical pressure sensor with sensitivity for sudden pressure change only," in *Abstract Booklet of the 2004 International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies*, p. 228, Niigata, June 7-10 (2005).
- (2) Y. Endo, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Guided-wave optical pressure sensor responding only to changing pressure," *Proceedings of SPIE*, **5728**, pp. 309-316 (2005).

関連論文

- (1) M. Ohkawa, K. Hasebe, C. Nishiwaki, S. Sekine, and T. Sato, "Integrated optic pressure sensor using intermodal interference between two mutual orthogonal guided-modes," *Optical Review*, **7**, 144-148 (2000).
- (2) M. Ohkawa, Y. Shirai, T. Goto, S. Sekine, and T. Sato, "Silicon-based integrated optic sensor using intermodal interference between TM-like and TE-like modes," *Fiber and Integrated Optics*, **21**, 105-113 (2002).
- (3) M. Ohkawa, K. Hasebe, S. Sekine, and T. Sato, "Relationship between sensitivity and waveguide position on the diaphragm in integrated optic pressure sensors based on the elasto-optic effect," *Applied Optics*, **41**, 5016-5021 (2002).
- (4) A. Yamada, T. Tokita, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Scale reduction rule for diaphragm dimensions to miniaturize a silicon-based integrated optic pressure sensor without reducing sensitivity," *Proceedings of SPIE*, **4987** (2003).
- (5) Y. Iwase, Y. Okamoto, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Sensitivity dependence with respect to diaphragm dimensions in a glass based integrated optic pressure sensor," *Proceedings of SPIE*, **4987** (2003).