OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	シリコン基板光集積回路センサに関する研究
Author(s)	大河, 正志
Citation	大阪大学, 1989, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2417
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

シリコン基板光集積回路センサに関する研究

大　河　正　志

平成元年 2 月

大阪大学大学院基礎工学研究科

シリコン基板光集積回路センサに関する研究

大河正志

平成元年2月

大阪大学大学院基礎工学研究科

内容梗概

本論文は、著者が大阪大学大学院基礎工学研究科（物理系専攻、電気工学分野）在学中に行った「シリコン基板光集積回路センサに関する研究」をまとめたものである。全体は、本文５章と謝辞からなっている。以下に各章の内容の概略を示す。

第１章　序論

本章では、まず、光集積回路センサの基本的な原理と特徴を述べ、これまでの研究を概観する。さらに、シリコンの特徴を示し、微細構造を光集積回路センサへ適用することの有用性について述べ、その中で、本研究の目的とその位置づけを明らかにする。

第２章　シリコン微細構造の光集積回路センサへの適用

本章では、シリコン微細構造を光集積回路センサに適用する方法とその利点について述べる。まず、シリコンの異方性エッチングによって形成される微細構造について述べる。さらに、光の干渉を利用するセンサを構成する場合に不可欠となるシリコン基板光導波路のチャネル化及び単一モード化について述べる。センサの構成法では、特に、高感度の計測が期待される光の位相変化を利用するものについて述べる。

第３章　ダイアフラム構造を利用した光集積回路センサ

本章では、シリコン微細構造としてダイアフラムを検出部に利用した光集積回路センサについて述べる。このセンサは、被測定物理量によるダイアフラムの変形を導波光の位相変化として捉えるもので、干渉を利用して位相変化を光強度変化に変換して検出するものである。まず、センサの構成と動作原理について述べる。センサの実現性の考察や設計を行う上で重

要となる動作解析の手順を示す。さらに、動作解析をもとに、圧力センサを設計、試作し、動作実験を行った結果について述べる。

第４章　カンチレバ構造を利用した光集積回路センサ

本章では、検出部にカンチレバ構造を利用するセンサを扱っている。このセンサは、カンチレバの変形により生じる導波光の位相変化を用いるものである。まず、その基本構成と動作原理について述べ、動作解析法を示す。そして、この構成を振動（加速度）や流量の計測に適用する方法を示し、それらのセンサの設計指針を明らかにする。さらに、実際に流量センサを試作し、流量計測を行った結果について述べる。

第５章　結論

本章では、本研究を通して得られた成果を総括し、それをもとに、問題点や今後の課題について述べる。

シリコン基板集積回路センサに関する研究

目次

第１章　序論

１－１　光集積回路センサ ---------- 1
１－２　シリコン基板の利用 ---------- 3
１－３　論文の構成 ---------- 5

第２章　シリコン微細構造の光集積回路センサへの適用

２－１　序言 ---------- 7
２－２　シリコンの微細機械構造 ---------- 7
２－２－１　機械的特性 ---------- 7
２－２－２　異方性エッチング技術 ---------- 9
２－３　光集積回路構成の利用 ---------- 12
２－３－１　シリコン基板光導波路 ---------- 12
２－３－２　リブ形光導波路の単一モード化 ---------- 19
２－４　センサの構成法 ---------- 22
２－５　結言 ---------- 28

第３章　ダイアフラム構造を利用した光集積回路センサ

３－１　序言 ---------- 31
３－２　素子構成法 ---------- 32
３－３　動作解析 ---------- 34
　３－３－１　解析手順 ---------- 34
　３－３－２　圧力と光出力の関係 ---------- 43
　３－３－３　ダイアフラムの耐圧 ---------- 47
３－４　試作、実験 ---------- 49
　３－４－１　設計及び試作 ---------- 49
　３－４－２　動作実験 ---------- 54
３－５　結言 ---------- 57

第４章　カンチレバ構造を利用した光集積回路センサ

４－１　序言 ---------- 59
４－２　素子の構成及び動作原理 ---------- 60
４－３　動作解析 ---------- 61
４－４　加速度センサ ---------- 67
　４－４－１　加速度と光出力の関係 ---------- 67
　４－４－２　周波数特性 ---------- 70
４－５　流量センサ ---------- 74
　４－５－１　流量計測の原理 ---------- 74
　４－５－２　流量と光出力の関係 ---------- 78
　４－５－３　設計及び試作 ---------- 81
　４－５－４　動作実験 ---------- 85
４－６　結言 ---------- 87

第５章　結論 ---------- 89

付録Ａ　４層スラブ光導波路の界分布 ---------- 93
付録Ｂ　ダイアフラムのたわみ ---------- 94
付録Ｃ　カンチレバのたわみ ---------- 99
付録Ｄ　解析に用いた係数 ---------- 101

謝辞 ---------- 103

参考文献 ---------- 104

本研究に関する発表 ---------- 107

第1章　序論

1－1　光集積回路センサ

近年の光エレクトロニクスの急速な発展に伴い、センシングに光技術を適用することが広く試みられるようになってきた。光波のもつ利点を生かすことによって、高感度、高精度、無誘導性、防爆性などの優れた特性をもつセンサを構成できるものと期待される。センサが電磁雑音や可燃性ガスなどの存在する悪環境下におかれる場合、従来のセンサでは、これらの対策をセンサあるいはセンシングシステムに施す必要があったが、光波利用センシングでは、このような環境下でも安定な計測が行えるものと期待できる。

図1－1は光波利用センシング系の基本的な構成である。光源、物理量や化学量の検出部、光回路と光検出部からなり、光波が検出部を通過すると、そこで被測定量に応じた変調を受ける。一般に、光信号が変調を受ける場合のパラメータには、光強度、位相、周波数、偏波などがある。次の光回路部はその光信号を光検出器で検波するために、適当な処理を行う部分であり、例えば、光信号が位相変調を受けた場合には、干渉を利用して光強度変化に変換することなどが考えられる。

光強度が直接変調を受ける形式のセンサでは、そのまま光検出器で検出できるので、図1－1の光回路において光強度に変換することが不必要となり、構成が比較的簡単になる。この構成はこれまで考えられてきた光利用センサでは最も一般的であり、代表的な方式と言える。一方、光の波としての性質を利用し、位相が変調される構成のセンサでは、光の波長ある

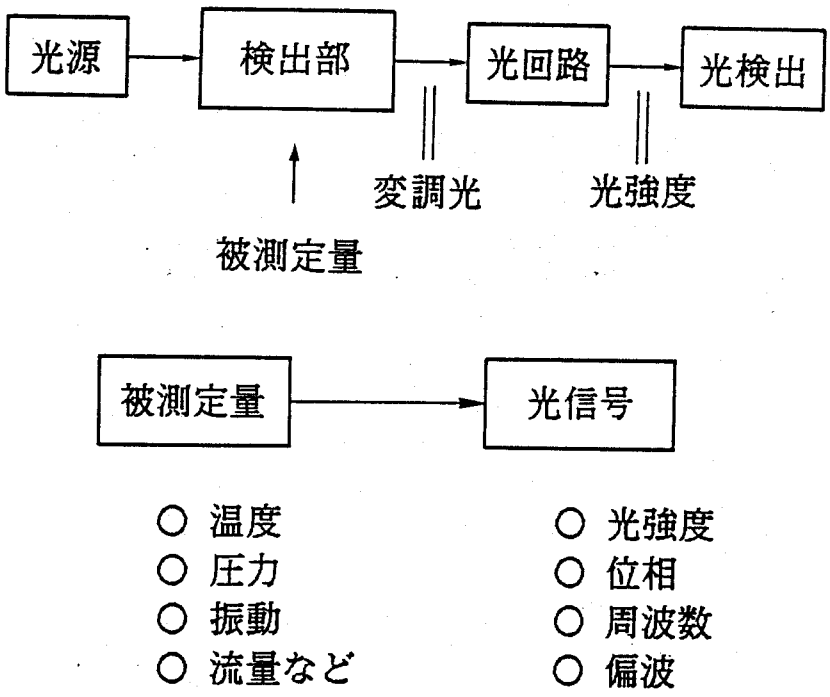


図１－１　光波利用センシング系の基本構成

いは周期が受ける微少な変化をもとに計測を行うことができ、高感度なセンシングが実現できるものと期待されている[2]。本研究では、主に、位相変調を利用する構成のセンサを扱うことにした。

光ファイバや基板形光導波路（ガラス、$LiNbO_3$など 適当な基板に作製した光導波路）に代表される光導波技術を光波利用センシングに導入することにより、素子の小型化、計測の安定化が可能になるものと考えられる。中でも、光ファイバセンサは以前から研究が活発に行われており、様々な構成法、動作原理が報告され、測定対象は温度、圧力や振動など多岐に渡っている。

一方、光集積回路構成を利用することにより、光素子が１つの基板上に

集積されるので、外力による軸ずれなどの心配がなく、安定で、信頼性の高い計測を行えるものと期待される。光集積回路センサに関する研究は、１９８１年に L.M.Johnsonらによって報告された温度センサ[3]が最初であると思われ、それと時期をほぼ同じくして、井筒らによって微少変位[4]、温度センサ[5]が報告され、さらに、榎原らによる流体センサ[6]の報告がある。しかし、この研究は、まだ始まって日が浅く、研究途上の段階にあるといえ、研究報告例が多いとは言えない。光集積回路センサの持つ優れた特徴から、性能の向上やこれまで不可能であった計測への適用の可能性があり、今後、より活発な研究が望まれる。

ところで、センシングに位相変化を利用すると、高感度化が期待できる反面、外乱の影響を受けやすいと言える。光ファイバセンサでは、この外乱の影響が問題となり、その対策も研究されている[7]。センサを光集積回路化することにより、センシング用導波路と参照用導波路が近接して形成され、両導波路からの光波の位相差を検出するため、外乱を受けてもその影響は相殺される。したがって、位相変化を利用する構成のセンサでは、光集積回路構成は、特に有効になるものと考えられる。

近年、光集積回路と優れた光伝送特性を有する光ファイバを接続する技術の発展がみられるが、センサヘッドと光ファイバの接続により、センサのもつ光波利用の利点を損なうことなく、遠隔計測システムを構成できるものと期待される。

１－２　シリコン基板の利用

本研究では、光集積回路センサ用基板として半導体材料であるシリコンの利用を考えた。以前から、シリコンは光集積回路用基板として、その有用性を指摘されいるが、研究例は必ずしも多いとは言えない。

シリコンを基板として用いる利点は、

１）優れた微細構造材料であること[8]、

２）光回路と光検出器や信号処理を行う電子回路を同一基板上に集積化できること、

３）超ＬＳＩ技術で代表される高度な作製プロセスを利用できること、

４）良質な大面積ウエハーを安価に利用できること

などである。

特に、１）の特徴から、異方性エッチング技術を利用して、シリコン基板に比較的高精度に微細な３次元構造を作りつけることが可能となる。微細構造を利用する技術はマイクロマシニング技術と呼ばれ、以前から活発に研究が行われている。これまでに、歪ゲージを利用した圧力センサ[9]やマイクロポンプ[10]などが試作され、中には実用化されているものもある。

本研究では、シリコン微細構造を光集積回路センサに適用することを試みている。このような観点に基づくセンサはこれまでに報告されたものはなく、本研究が最初の試みであり、光集積回路センサの適用範囲がさらに拡大するものと期待される。また、１－１で述べたように、従来のセンサにはない無誘導性、防爆性などの利点を生かしたセンサを構成できるものと考えられる。

一方、シリコンの電子材料としての特徴を生かし、光回路と電子回路を集積化する研究も行われている[11-13]。 また、最近では、シリコン基板上に化合物半導体であるＧａＡｓを成長させ、半導体レーザの発振も可能となっている[14]。本研究では、直接には念頭に置いていないが、光源も含めた集積化の可能性があり、今後、このように集積化を目指した研究もますます活発化して行くものと思われる。

１－３　本論文の構成

本論文は、シリコン微細構造を利用した光集積回路センサに関する一連の研究をまとめたものである。

第２章では、微細３次元構造を光集積回路センサに適用する方法について述べる。センサを構成する上で、シリコン微細構造の形成とシリコン基板光導波路の作製が不可欠となる。まず、微細構造を作製する技術について述べ、次に、光の干渉を利用する場合重要となる、光導波路のチャネル化と単一モード化について述べる。チャネル化の方法としてはリブ形を考え、その単一モード化を行っている。さらに、実際に微細構造をセンサに適用する方法を示す。ここでは、光強度変化ならびに位相変化を利用する構成法についてそれぞれ考察する。

第３章では、微細構造としてダイアフラムを利用した光集積回路センサについて述べる。ここでは、高感度な計測が期待される光の位相変化を利用する形式のセンサを考えている。ダイアフラムはシリコン基板の一部を薄板状にしたもので、その表裏に圧力差を与えると変形が生じるので、その上に作製した光導波路中を進む光波の位相変化として、その変形を捉えることができる。光の干渉を利用して捉えられた位相変化を光強度変化に変換し、これを検出する。まず、センサの構成と動作原理を示し、次に、センサの実現性を考察するために行った動作解析について述べる。さらに、基本的な動作を確認するために試作した圧力センサの動作実験の結果について述べる。

第４章では、前章のダイアフラム構造に代わって、カンチレバ構造を利用するセンサを扱っている。カンチレバは、一端が固定され、他端は自由に変動できるように作製した、いわゆる片持ち梁のことである。カンチレバに力が働くと、弓状に変形するので、これを導波光の位相変化として検出する。したがって、第３章と同様に、力や圧力を光信号に変換するトラ

ンスデューサとして使用することができる。測定対象により、この力を効率よく与えることができれば、センサとしての動作が可能となる。ここでは、加速度センサ、流量センサの構成法と原理について述べ、その実現性について考察する。さらに、流量センサについて、その基本動作を確認するために行った実験の結果について述べる。

第５章では、本研究で得られた結果を総括し、本論文の結論とする。

第２章　シリコン微細構造の光集積回路センサへの適用

２－１　序言

シリコンは、半導体電子材料としてばかりでなく、微細構造材料としても優れた特徴を有している。シリコンのマイクロマシニング技術を用いて作製される微細構造をセンサ、あるいはその他の機能素子に応用する研究が活発に行われている。本章では、光波利用センシングの特徴を生かし微細構造を光集積回路センサに適用する可能性を探る。光波利用センシングは無誘導性、防爆性などの特徴を有し、特に、電磁雑音の多い環境や爆発の危険を伴う環境下での計測には、その特徴や利点を十分に発揮できるものと期待される。

以下では、まず、シリコンの機械的特性を示すと共に、微細構造作製技術について述べる。次に、光集積回路センサを構成する上で不可欠となる光導波路のチャネル化、単一モード化について述べる。最後に、シリコン微細構造を光集積回路センサに適用する方法を考察し、機械的変形により、光信号の位相変化を誘起して計測に利用する形式のセンサについて、その利点を明らかにする。

２－２　シリコンの微細機械構造

２－２－１　機械的特性

シリコンの微細構造を利用する上で、まず、シリコンの微細構造材料と

しての特性について知ることが重要である。表２－１に主な材料の物性定数を示す[8]。 これによると、シリコンのヤング率は、ステンレスとほぼ同じという大きな値である。応力に対する伸びが小さく、変形が生じにくい材料であると言える。また、硬度は、窒化シリコン（Si_3N_4）やシリコンカーバイド（ＳｉＣ）に比べると小さいが、石英とほぼ同じ程度である。さらに、引っ張り強さは、石英とほぼ同じ、ステンレスの約３倍である。これらのことから、シリコンは、機械的にかなり強い材料であると言える。

しかし、結晶欠陥などが生じると、必ずしも常にこの優れた機械的特性を発揮できるとは言えない。したがって、シリコンを微細構造材料として利用する場合、素子作製時に、結晶欠陥、歪などを極力抑えることが重要である。そのためには、微細構造を、切断、研磨などの物理的加工でなく、エッチングなどによる化学的加工により作製するのがよいと言える。なぜなら、物理的加工は、結晶の表面や内部に結晶欠陥を引き起こすことがあ

表２－１　シリコンとその他の材料の物性定数

	引っ張り強さ (10^9Pa)	硬度 (kg/mm^2)	ヤング率 (10^{11}Pa)	密度 (g/cm^3)	熱膨張率 (10^{-6}/℃)
シリコン	7.0	850	1.9	2.3	2.33
SiO_2	8.4	820	0.73	2.5	0.55
SiC	21	2480	7.0	3.2	3.3
Si_3N_4	14	3486	3.85	3.1	0.8
ステンレス	2.1	660	2.0	7.9	17.3
Al	0.17	130	0.70	2.7	25

るが、化学的に方法では、そのようなことが少ないと考えられるからである。

微細構造は、異方性エッチング技術を用いて形成されることが多い。この場合でも、形成された構造の角の部分に応力が集中、蓄積しやすく、この部分から破壊が生じやすい。応力の集中、蓄積を小さくするため、等方性エッチングなどにより形状を滑らかにすることが重要となる。

また、高温プロセスの利用は基板内部に熱応力を生じさせ、結晶欠陥の原因になりやすい。そこで、なるべく低温プロセスを利用して、熱応力の低減を計ることが不可欠となる。

このように加工法に細心の注意を払い、結晶欠陥の原因となるものを抑制することにより、シリコン本来の機械的強度に近い微細構造を作製できることになる。

２－２－２　異方性エッチング技術

シリコンの３次元加工には、多くの場合、異方性エッチング技術が利用される。異方性エッチングでは、結晶面により、エッチングされる速度が異なる。一般には、（１００）面、（１１０）面、（１１１）面の順にエッチング速度が遅くなる。エッチング液には、主に、アルカリ系[15]、エチレンジアミン系[16,17] のものが利用される。その例を表２－２に示す[8]。 表より、ＫＯＨ系のエッチング液は、異方性の程度を表す(１００)面と(１１１)面のエッチングレートの比が大きく、異方性に優れているといえる。

しかし、実際にエッチングを行う場合、マスク材料の選定が重要となる。エチレンジアミン系のエッチング液では、熱酸化などで良質な膜が得られる二酸化シリコンを利用できるが、ＫＯＨ系のエッチング液では、二酸化シリコンのエッチングレートがやや速く、長時間のエッチングを必要とす

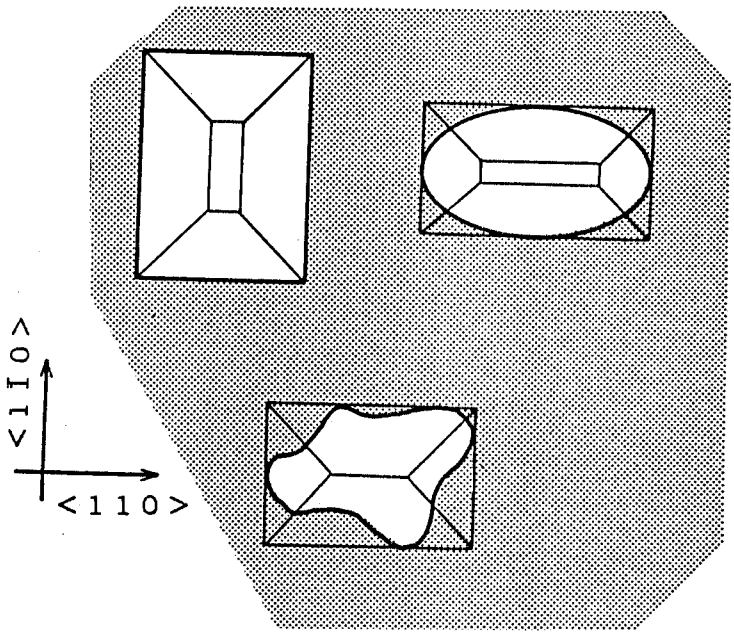
るときには問題となる。このような場合、一般に、窒化シリコンがマスク材料として利用される。

本研究では、長時間のエッチングが必要となるため、マスク材料としてシリコン酸化膜が利用できる点に重きを置き、エチレンジアミン系のエッチング液を使用することにした。

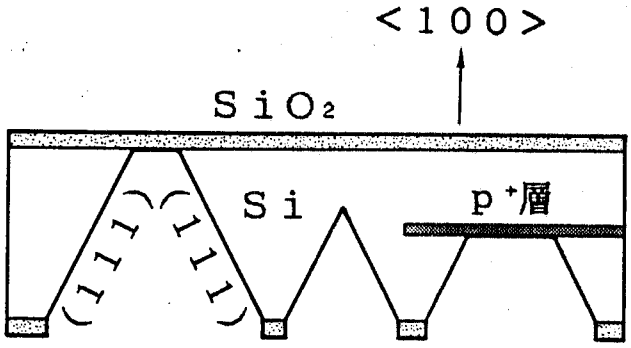
図２－１（ａ）は、（１００）面のシリコンを上から見た図で、十分に異方性エッチングを行った後のエッチング形状である。網掛けの部分がエッチングのマスクで、一般には二酸化シリコンや窒化シリコンが用いられる。

表２－２　シリコンの異方性エッチング液

エッチ液	配合	温度 (℃)	エッチレート (μm/分)	異方性 (100)/(111) エッチレート比	不純物濃度 依存性
エチレンジアミン ピロカテコール 水	７５０ｍｌ １２０ｇ ２４０ｍｌ	１１５	１.２５	３５:１	7×10^{19} cm^{-3}以上 エッチレート 1/５０に減少
	６８０ｍｌ １２０ｇ ３２０ｍｌ	１１８	０.８５	５０:１	
KOH (水,IPA)	４４ｇ １００ｍｌ	８５	１.４	４００:１	10^{20} cm^{-3}以上 エッチレート 1/２０に減少
	５０ｇ １００ｍｌ	５０	１.０	４００:１	



（a） 平面図



（b） 断面図

図２－１　異方性エッチング後の形状

図には、長方形、楕円と任意形状のマスクパターンについて示しているがパターンに関係なく、表面の形状は、＜１１０＞方向を辺とする長方形となり、エッチング速度の最も遅い（１１１）面で囲まれたピラミッド状の構造となる。（１１１）面のエッチングが遅いためアンダーエッチングの進行は小さく、あらかじめ図の左上のように＜１１０＞方向を辺とする長方形にマスクをパターニングすることにより、パターン通りに比較的高精度に微細なピラミッド構造を基板に作り付けることができる。

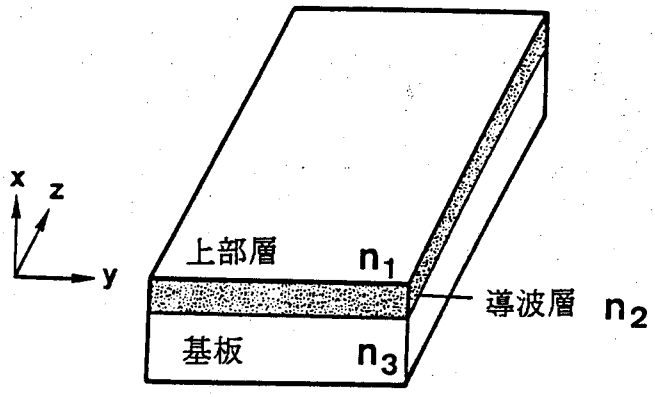
このように異方性エッチングでは、基板面内のエッチングの制御は比較的容易であるが、微細構造を作製する場合、基板の厚さ方向の制御も必要となる場合が多い。その制御には、高濃度ボロンドープ層（キャリア密度$7\times10^{19}cm^{-3}$以上の層のことで p^+層と略す）の利用が有効である。図２－１（ｂ）は、異方性エッチング後の断面形状の一例である。左の２つは、p^+層を 利用しない通常のエッチング形状で、（１１１）面が完全に現れたところで、また、裏面のマスクに達したところでエッチングの進行が止まる。右の形状は、p^+層を 基板内に埋め込んだときのもので、p^+層ではエッチング速度が １／５０ 程度に落ちるため[18]、エッチング進行がここでほぼ止まることになるので、基板の厚さ方向のエッチングの制御が可能となる。

本研究においても、実際に、高濃度ボロンドープ層を埋め込んだ基板を利用し、微細構造の高精度な作製を試み、その有効性を確認している。

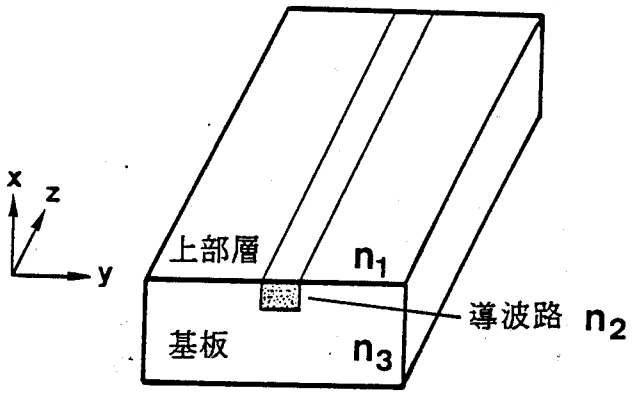
２－３　光集積回路構成の利用

２－３－１　シリコン基板光導波路

光導波路を大別すると、スラブ導波路(２次元導波路とも言う)とチャネル導波路(３次元導波路とも言う)に分けることができる。図２－２(ａ)は



（a） スラブ導波路



（b） チャネル導波路

図２－２　光導波路の構造

スラブ導波路の基本的な構造で、上部層、導波層、基板の３層からなる。n_1、n_2、n_3は それぞれ上部層、導波層および基板の屈折率で、$n_2 > n_1$, n_3に設定する。普通、上部層は空気であることが多い。このような構造では、ｘ方向にのみ光が閉じ込められ、ｙ方向には屈折率変化がなく光の閉じ込め作用はない。一方、図２－２(ｂ)はチャネル導波路の構造の

一例である。この例では、埋め込み形と呼ばれるものを示している。チャネル導波路では、ｘ方向およびｙ方向に屈折率変化あるいは構造変化をもたせることにより、両方向に光を閉じ込めて伝送する。

光集積回路センサをはじめ種々の導波形光機能素子を基板上に構成する場合、光導波路のチャネル化(いわゆる３次元導波路の実現)が重要となる。また、光の干渉を利用する場合には、導波路の単一モード化が不可欠となることが多い。そこで、ここでは、シリコン基板光導波路のチャネル化と単一モード化について考察する。

これまでに、シリコン基板上に作製された光導波路には、火炎堆積法による石英系光導波路[19]、ＡＲＲＯＷ構造を利用した光導波路[20]およびキャリア密度に差をつけシリコン自体を導波層とした光導波路[21]などがあり、比較的低損失なチャネル導波路も報告されている。しかし、このような光導波路の研究は、本研究を始める同時期か、それ以降に行われたものであり、この研究を進める上で、まず、単一モードのチャネル導波路を実現することが必要であった。

ここでは、波長 ０.６３μｍの可視光を導波するチャネル光導波路として、図２－３に示すリブ形構造のものを考える[22]。膜厚方向には、シリコン上に、バッファ層を設け、その上に導波層のガラスを形成している。光は屈折率の高いガラス層に閉じ込められるが、シリコンの複素屈折率（３.８５－ｊ０.０７）[23]が、ガラスの屈折率 （１.５４）[24]に比べてかなり高いので、この構造では、光波のシリコン基板への放射が不可避となる。この導波路は一種の漏れ導波路であるので、厳密な意味での導波モードは存在しないが、漏れ放射損失が小さくなる光導波条件があり、この条件を満たすモードを導波モードと見なすことができる。ところで、バッファ層は、導波光がシリコン基板へ放射するのを抑えるためのもので、導波層より屈折率の低い材料で形成され、ここでは、良質な膜を作製できる二酸化シリコンを考えることにした。リブ形光導波路では、ｙ方向にも光を閉じ込めるために、図のように導波層の膜厚に違いを設ける。図２－４

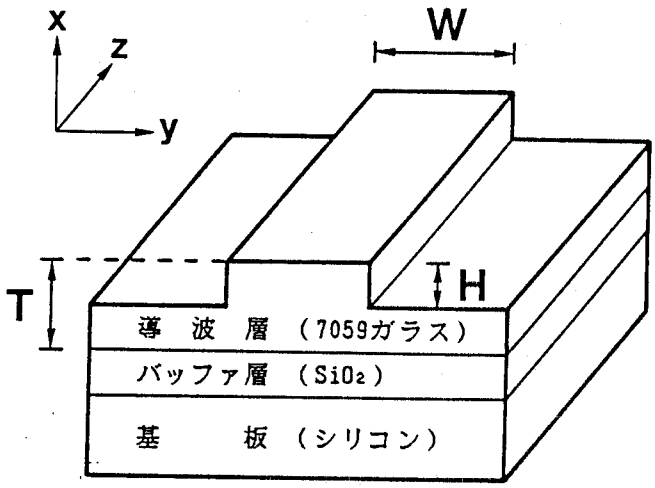


図２－３　シリコン基板リブ形光導波路

は導波層の膜厚に対する等価屈折率の変化を概念的に表している。膜厚の厚い部分が等価的に屈折率が高くなり、その部分に光が閉じ込められる。

さて、ここで、図２－３の構造の導波路で問題となるシリコン基板への放射損失について考察する。放射損失を小さくするためには、バッファ層の膜厚を十分厚くすればよいといえるが、作製時間や基板のそりなどの問題があり、むやみに厚くするわけにはいかない。そこで、最低限必要となるバッファ層の膜厚について考察した。ここでは、リブ形構造の導波路についてではなく、簡単のため図２－５に示す４層スラブ導波路について解析を行った。まず、４層スラブ導波路の電磁界を式（付録Ａ－１）のように置き、その電磁界の境界面上での連続性の条件から次の特性方程式が得られる[22]。

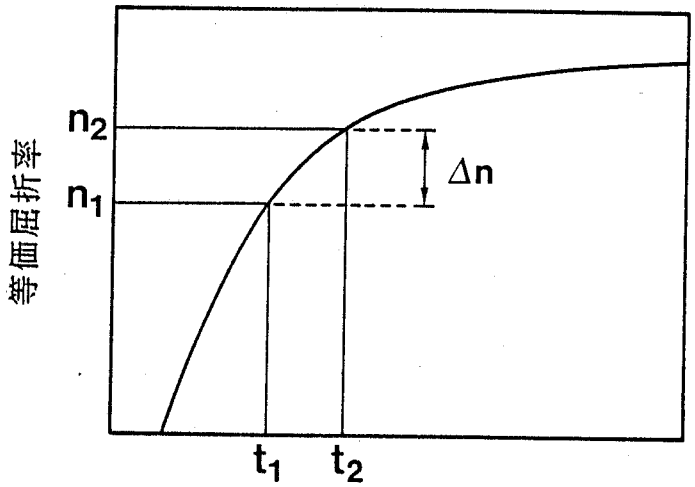


図２－４　リブ形導波路のおけるｙ方向の
光の閉じ込めの原理

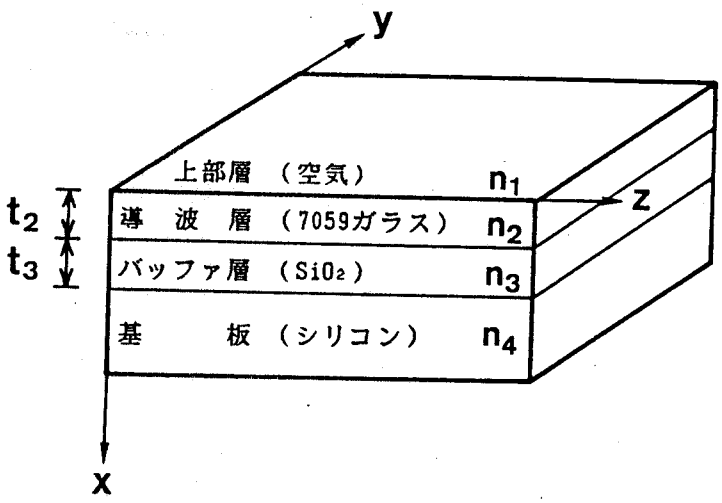


図２－５　４層スラブ光導波路

$$k_{x2}t_2 = \tan^{-1}\left(\frac{k'_{x1}}{k_{x2}}\right) + \tan^{-1}\left\{\frac{k'_{x3}}{k_{x2}} \cdot \frac{(k'_{x4}/k'_{x3}) + \tanh(k_{x3}t_3)}{1 + (k'_{x4}/k'_{x3})\tanh(k_{x3}t_3)}\right\} + m\pi \qquad (2-1)$$

ここで、

$$\begin{cases} k_{x1}^2 = \beta^2 - (k_0 n_1)^2 \\ k_{x2}^2 = (k_0^2 n_2^2)^2 - \beta^2 \\ k_{x3}^2 = \beta^2 - (k_0^2 n_3^2)^2 \\ k_{x4}^2 = \beta^2 - (k_0^2 n_4^2)^2 \end{cases}$$

$$k'_{xi} = \begin{cases} k_{xi} & (\text{TEモード}) \\ (n_2/n_i)^2 k_{xi} & (\text{TMモード}) \end{cases}$$

ただし、mはモード次数、k_0 は真空中での波数、βは伝搬定数である。

この方程式を数値計算により解いて、複素伝搬定数を求め、その伝搬定数の虚部を２倍して放射損失係数を得た。図２－６はバッファ層の膜厚に対する損失の変化の例を示している。光の波長を０.６３ μm、導波層材料をコーニング７０５９ガラスとした。導波層の膜厚は０.８ μmとしている。図より、TMモード光に対する損失は、TEモード光に比べ１桁程度大きいことが分かる。放射損失を、導波路の不均一性に起因する散乱損失や導波路材料のもつ吸収損失より十分小さくできれば、シリコン基板の

影響はほとんど無視できるといえる。代表的な光導波路の伝搬損失は、数ｄＢ/ｃｍであり、そこで、放射損失を ０.０１～０.１ ｄＢ/ｃｍ程度に抑えることを考え、バッファ層の膜厚は１.５ μｍ程度以上必要であると見積った。

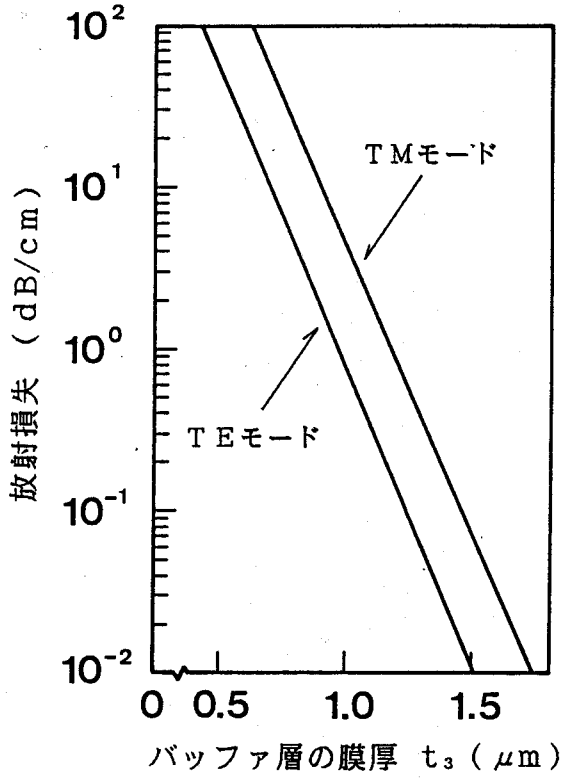


図２－６　バッファ層の膜厚とシリコンへの放射損失の関係

２－３－２　リブ形チャネル光導波路の単一モード化

図２－３に示したリブ形チャネル光導波路の単一モード条件について考察する。簡単のため、バッファ層の膜厚が十分厚いとして、シリコン基板の影響を無視した導波路を考え、等価屈折率法[25]を用いて単一モード条件を計算した。ここでは、光の波長は　０.６３　μｍとした。図２－７はリブ形導波路の単一モード条件を表している。単一モード条件には、ｘ方向とｙ方向の２つがあり、両者ともこの条件を満たさなければ単一モード導波路とならない。図では、導波層の膜厚をパラメータとし、横軸はリブの高さを、縦軸はｙ方向に単一モードとなる最大導波路幅を表している。ｘ方向の単一モード条件は、主に導波層の膜厚によって決まり、実線で示した導波層膜厚については、単一モードとなるが、点線で示した膜厚については、高次モードが励起され、単一モードとはならない。一方、各パラメータの示す曲線はｙ方向に単一モードとなる最大導波路幅を表しており、この幅より狭ければ、ｙ方向に単一モードとなる。したがって、単一モード導波路は、図中の実線より下の領域で実現できると言える。例えば、リブの高さを ０.１μｍとし、導波路膜厚を ０.８μｍとしたとき、単一モードとなる最大導波路幅は２.５μｍとなる。

さらに、実験的に単一モード条件を確かめるため、実際に光導波路を試作し、導波実験を行った。まず、ｘ方向の単一モード条件について調べるため、４層スラブ導波路を試作した。図２－８はその分散曲線であり、実線は計算値で、黒丸は実験値を示している。導波実験では、プリズムを用いて波長０.６３μｍの Ｈｅ－Ｎｅレーザ光を導波路に導波させ、出力光のｍラインを観測した。図中の等価屈折率の実験値は、出力にｍラインが現れたときのレーザ光のプリズムへの入射角より求めた[26]。計算値と実験値はよく一致している。ただし、導波層の膜厚 １.０μｍの時、計算では２つのモードが励起されるはずであるが、実験では１次モードの励起は確認できなかった。そこで、導波層膜厚１.０μｍを 単一モードとなる最

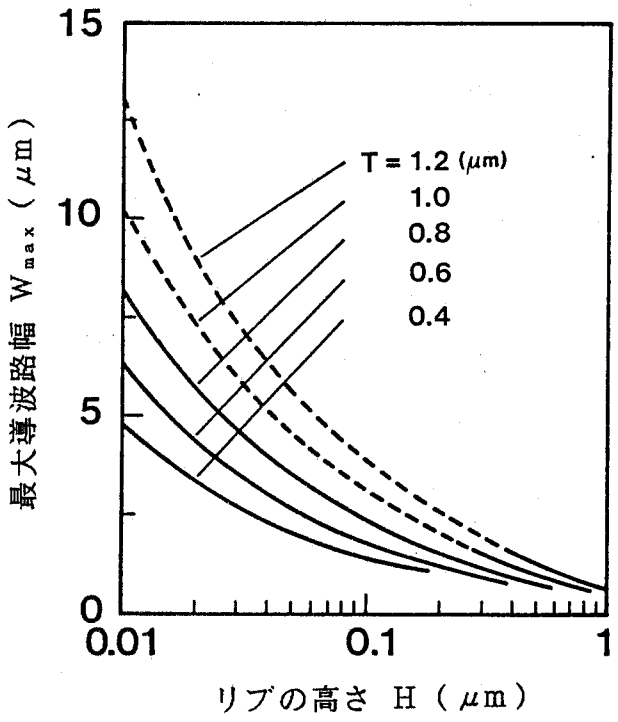


図２－７　リブ形導波路の単一モード条件

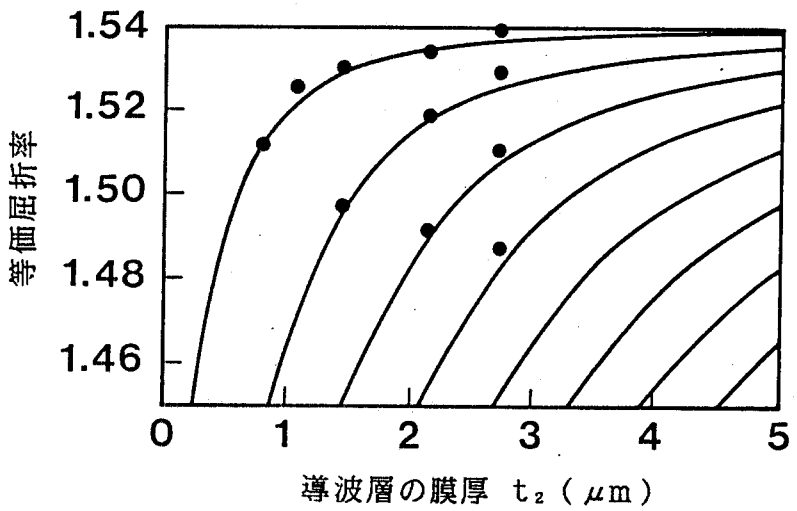


図２－８　４層スラブ導波路の分散曲線

大膜厚と考えることとした。

次に、ｙ方向の単一モード条件を確かめるため、導波層の膜厚を １.０μｍとしたリブ形直線導波路を作製し、導波実験を行った。リブの高さは０.１μｍとし、導波路幅は ２.０μｍから ５.０μｍまで ０.５μｍきざみに７種類のものを同一基板上に形成した。導波路端面より波長 ０.６３μｍのＨｅ－Ｎｅレーザ光を入射し、出力光の近視野像を観察した。図２－９は、導波路幅 ３.０μｍの導波路からの出力光の近視野像で、単一モード導波路であることが確認された。ただし、実際には、近視野像のみからｙ方向に単一モードとなる最大導波路幅を正確に確認するのは困難であった。

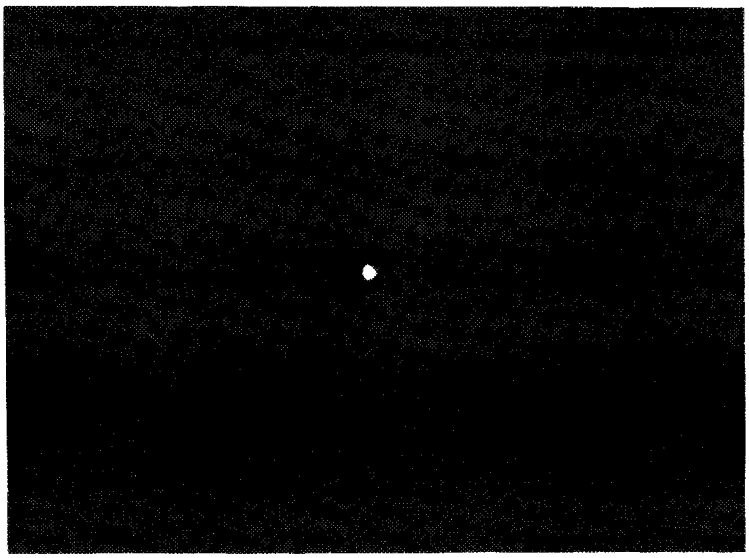


図２－９　リブ形導波路の近視野像の例

導波層の膜厚　１.０μｍ

リブの高さ　　０.１μｍ

導波路幅　　３.０μｍ

２－４　センサの構成法

この節では、シリコン微細構造を光集積回路センサへ適用する方法について考察する。すなわち、導波光の光強度変化と位相変化を利用して、物理量、化学量を検出する構成法を示す。

まず、光強度変化を利用する場合の構成法を考える。図２－１０はここで提案する一構成例であるが、微細構造は、カンチレバ構造と呼ばれるもので、一端は固定され、他端は自由に変動できるようになっている。直線導波路はカンチレバ上を通り、その先端で切断され、ギャップをはさんで出力側の導波路と向かい合っている。図２－１１（ａ）に示すように、入力された導波光は、一旦自由空間に放射され、再び導波路に結合する。このときの主な損失は回折広がりによる結合損失と端面でのフレネル損である。測定対象によって、（ｂ）のように微細構造が変形すると、向かい合った導波路間の軸ずれによる損失が生じ、出力光強度が変化する。この出力変化を検出すれば、物理量、化学量の計測を行える。

そこで、センサが動作する上での基本原理となる、導波路の軸ずれに対する結合効率の変化について考察した。結合効率とは、一旦、カンチレバから出射した光波が、他方の導波路に結合する割合を示すものである。図２－１２は軸ずれの生じた導波路の模式図であり、軸ずれ量をＤとし、導波路のギャップをＧとした。図２－１３はその計算結果であり、ギャップＧをパラメータとしている。計算では、光の波長は０．６３μｍとし、導波路端面でのフレネル損は考慮していない。図より、ギャップが小さいほど軸ずれに対する結合効率の変化が大きく、ギャップが大きいほど検出可能な軸ずれの範囲が広いと言える。

例えば、カンチレバ部の光導波路上に金属を蒸着して、バイメタル構造にすれば、熱膨張率の違いから温度変化によって、カンチレバが円弧状に変形するため、温度センサとしての動作が期待される[28]。

まず、温度に対してカンチレバの曲率ｒが変化する割合を計算した。た

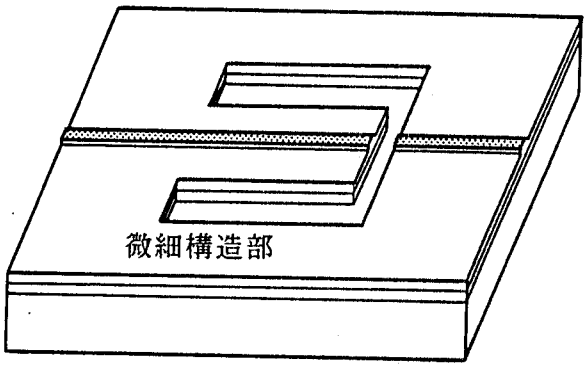
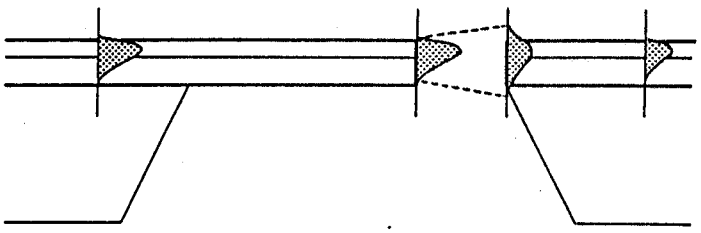
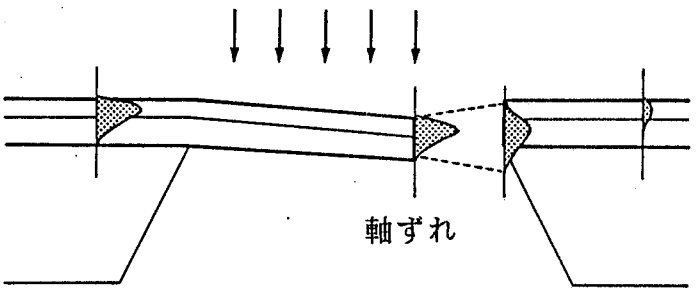


図２－１０　光強度変化を利用した
光集積回路センサ



（ａ）　軸ずれがないとき



（ｂ）　軸ずれがあるとき

図２－１１　動作原理

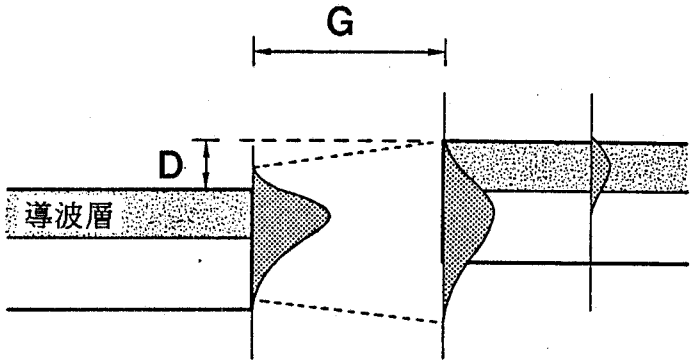


図２－１２　軸ずれした光導波路の模式図

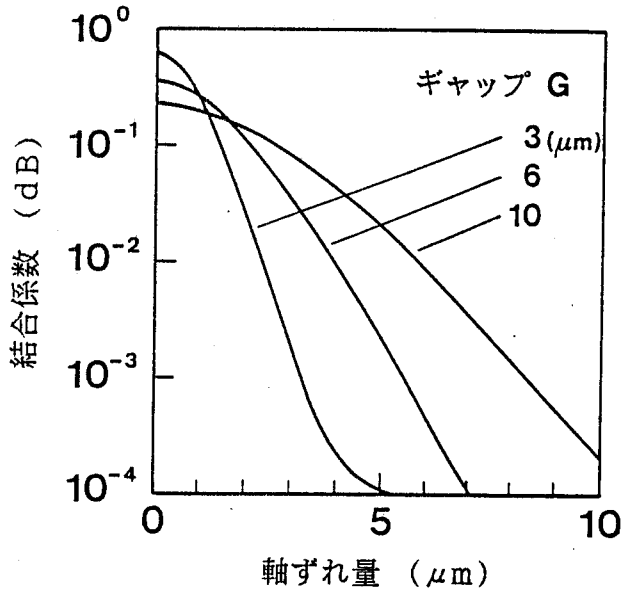


図２－１３　軸ずれ量と結合係数の関係

だし、バイメタル構造を構成する材料の一方を 膜厚３．０μｍの溶融石英（SiO_2）とし、他方をアルミニウムとした。図２－１４にその計算結果を示す。図より、カンチレバが温度に対して効率よく曲がるアルミニウムの最適膜厚があることが分かり、その膜厚は約１．５μｍである。

次に、アルミニウムの膜厚を １．５μｍとしたときの温度に対する光波の結合損失の変化を調べた。ただし、導波路のギャップは３μｍとした。図２－１５はその計算結果で、横軸はカンチレバの長さの２乗と温度変化量の積を、縦軸は結合損失を示している。図より、高感度な温度計測には、カンチレバの長さが長い方がよく、広範囲な温度計測には、長さが短い方がよいと言える。

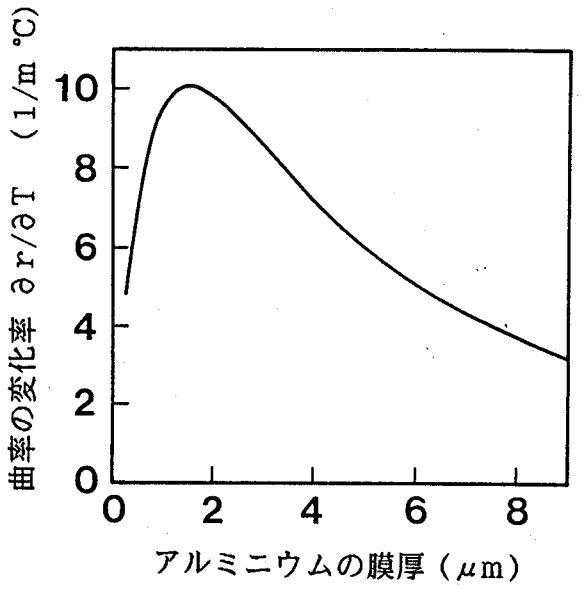


図２－１４　温度に対するカンチレバの曲率の変化率

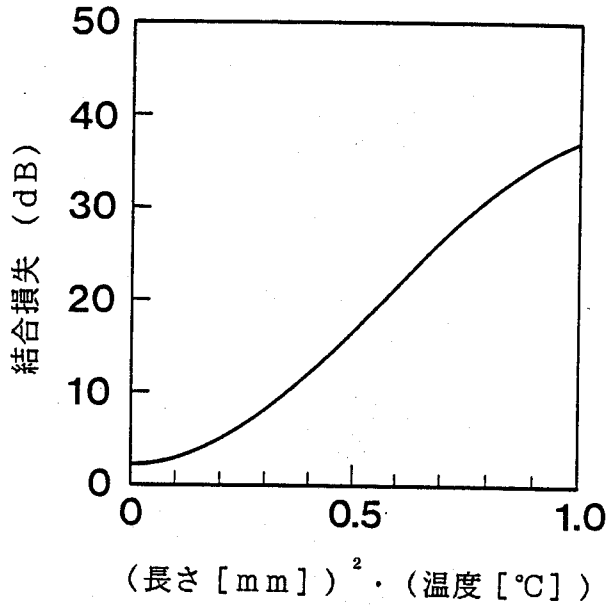


図２－１５　温度と結合損失の関係

次に、位相変化を利用する構成法について述べる。図２－１６、図２－１８はその構成例である。微細構造は、被測定物理量、化学量によって変形を起こし、その内部に歪が生じる。光弾性効果により屈折率が変化し、導波光に位相変化が生じる。また、変形にともない導波路長も変化し、それによっても位相変化が生じる。位相変化を直接捉えることはできないので、光の干渉を利用してこれを光強度変化に変換する。

導波形干渉計として、図２－１６はマッハツェンダ干渉計を用いた構成で、図２－１８はマイケルソン干渉計を用いた構成である。

マッハツェンダ干渉計は単一モード導波路で構成されたＹ分岐を２つ向かい合わせて接続した構成となっている。入力のＹ分岐で、導波光は１：１に分波される。２本の平行導波路の一方はセンシング用導波路で、導波

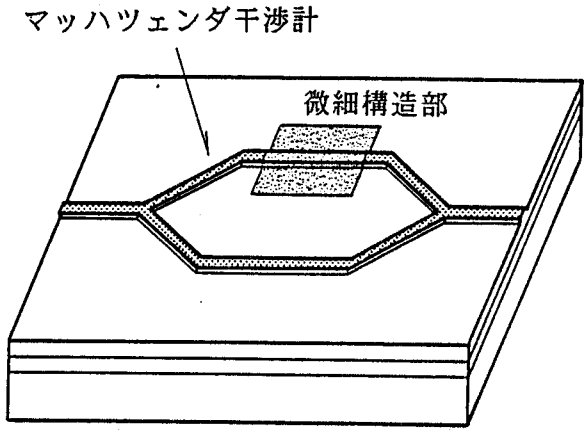
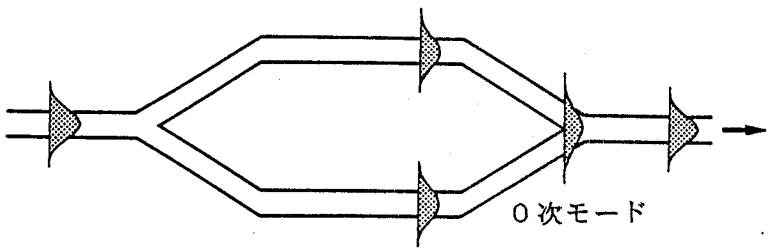
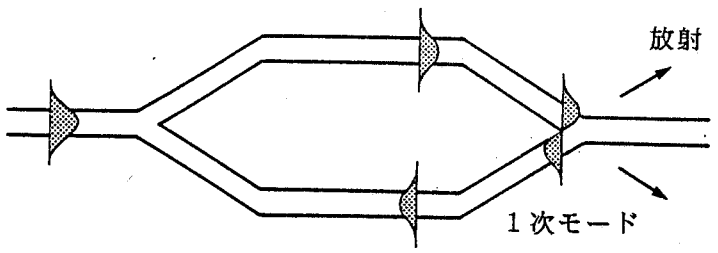


図２－１６　マッハツェンダ干渉計を用いた
光集積回路センサの構成



（ａ）　同相のとき



（ｂ）　逆相のとき

図２－１７　マッハツェンダ干渉計の動作

光は測定対象によって、被測定量に応じた位相変化を受ける。他方は参照用導波路である。位相差を持った両導波光は、出力側のＹ分岐で合波、干渉する。両導波光が同相の場合は、図２－１７(ａ)に示すように、合波部で０次モードが励起され、出力は最大となる。逆相の場合は、(ｂ)に示すように、合波部で１次モードが励起され、単一モード導波路では１次モードは伝搬できず放射され、出力は現れない。したがって、微細構造部での位相変化量に応じた光強度が出力され、物理量、化学量の計測を行うことができる。

マイケルソン干渉計を構成するため、非対称Ｘ分岐と呼ばれる光集積回路素子の利用も考えられている[27]。２組のＹ分岐を背中合わせに接続したもので、一方は幅の等しい２本の単一モード導波路からなる対称Ｙ分岐で、他方は幅の異なる２本の単一モード導波路からなる非対称Ｙ分岐である。非対称Ｙ分岐の幅の広い導波路に入力された光は、対称Ｙ分岐の２本の導波路に１：１に分波され、基板端面でミラーにより反射され、戻ってくる。一方はセンシング用導波路で、導波光は微細構造からなる位相変化部を通過し、他方は参照用導波路である。同相で両導波光が戻ってきた場合、図２－１９(ａ)に示すように、光は非対称Ｙ分岐の幅の広い方に出力される。また、逆相の場合は、(ｂ)に示すように、幅の細い方に出力される。幅の狭い方を出力とすると、マッハツェンダ干渉計と同様に、位相変化量に応じた光強度が得られる。

ここでは、光強度変化と位相変化を利用した光集積回路センサの構成法について述べた。後者の位相変化を利用する構成のセンサでは、光の波長あるいは周期が受ける微少な変化をもとに計測を行うことができ、高感度が期待される。さらに、光集積回路構成は外乱などの影響を受けにくく、特に、この形式のセンサでは有効であると言える。そこで、本研究では、主に、位相変化を利用する形式のセンサを取り扱うこととした。以下の章では、微細構造の具体例として、ダイアフラム構造とカンチレバ構造を考え、それらの構造のセンサへの応用について述べる。

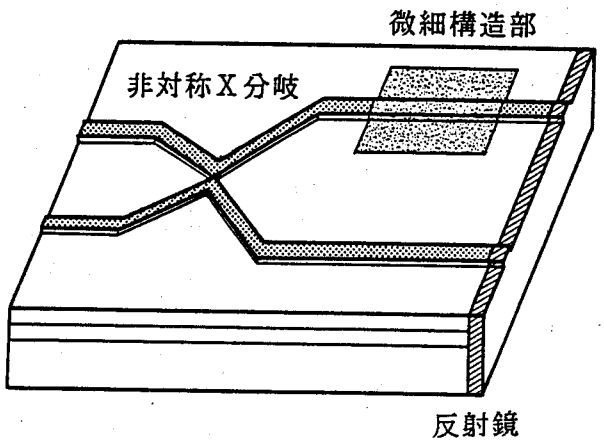
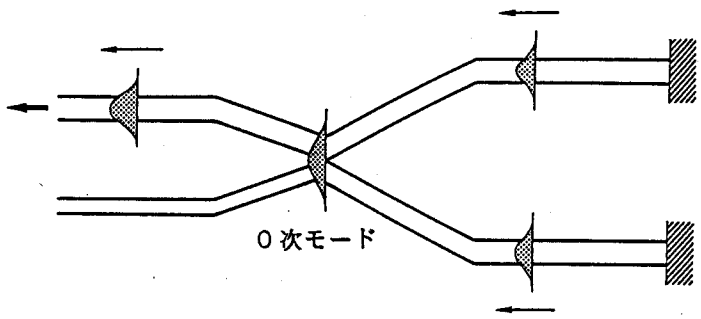
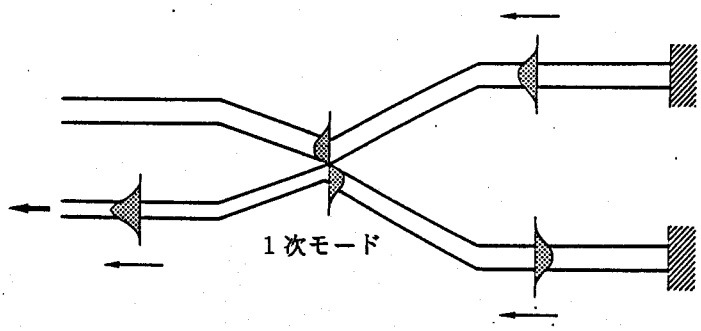


図２－１８　マイケルソン干渉計を用いた
光集積回路センサの構成



（ａ）　同相のとき



（ｂ）　逆相のとき

図２－１９　マイケルソン干渉計の動作

2－5　結言

本章ではシリコン基板微細構造を光集積回路センサに適用する方法について述べた。このような考えに基づくセンサは、これまでに報告されたことはなく、光集積回路センサの適用範囲をさらに拡大するものと期待される。

まず、シリコン微細構造の作製技術について述べた。次に、リブ形チャネル光導波路の単一モード条件を等価屈折率法により求め、実際に導波路を試作し、導波実験を行い、その条件を確かめた。

最後に、シリコン微細構造を利用した光集積回路センサの構成法を示した。ここで考えたセンサは、被測定量により生じる微細構造の変形を導波光の強度変化および位相変化を利用して検出するものである。まず、光強度変化を利用する形式のセンサの一構成法を示し、次にその動作解析を行った結果について述べ、さらに応用の一例として、温度センサを考え、その実現性を明らかにした。その後、位相変化を利用する形式のセンサの構成および原理について述べた。本研究では、多くの場合、高感度な計測が期待される光波の位相変化を利用した形式のセンサを扱っている。

第３章　ダイアフラム構造を利用した光集積回路センサ

３－１　序言

第２章で述べたセンサの構成法に従い、微細構造としてダイアフラムを考え、その光集積回路センサへの適用について考察する。ダイアフラムとは、薄い板状の構造で、その表面と裏面の間に圧力差が生じると変形が起こる。この変形量を導波光の位相変化に変換し、光の干渉を利用して光強度変化として検出する。したがって、これは圧力差を検出するセンサと言える。

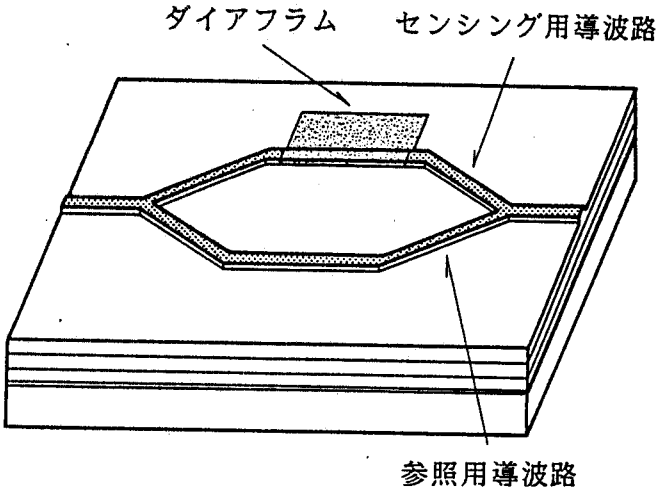
圧力は計測分野において、測定対象として重要視される物理量の１つである。最近では、圧力センサの小型化、低価格化によりＭＥ、自動車や家電などに利用され、その応用範囲は急速に広がっている。また、流量や粘度などの物理量は圧力を介して間接的に計測することができ[29]、センサの利用は単なる圧力計測だけにとどまらない。

光集積回路構成を利用することにより、小型、軽量となり、また過酷な環境下でも安定で、信頼性の高い計測が行えるものと期待される。さらに、光伝送路として優れた特徴を持つ光ファイバとの接続によりリモートセンシングも可能となる。

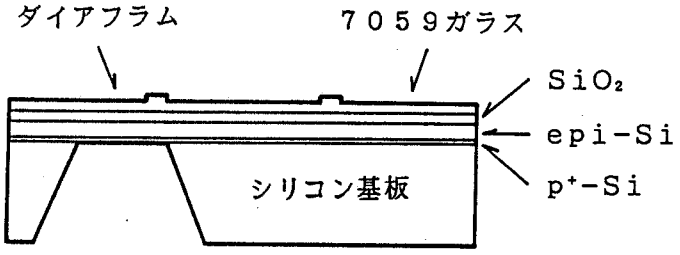
以下では、センサの実現性の考察やその設計を行うための動作解析手法を示し、その解析結果について述べる。さらに、圧力センサとしての基本動作を確認するため、センサを設計、試作し、動作実験を行った結果について述べる。

３－２　素子構成法

図３－１は、ここで考えているセンサの概形と断面図である。圧力検出部にダイアフラム構造を利用している。ダイアフラムを異方性エッチングにより作製することとし、基板の厚さ方向にエッチングを制御するため、基板とエピタキシャル層の間に高濃度ボロンドープ層（p^+層）を 形成し



（a） 概形



（b） 断面図

図３－１　ダイアフラム構造を利用した
光集積回路センサ

ている。したがって、ダイアフラムを所定の厚みに正確に作製することができる。ダイアフラムは、薄板状のもので、その上面と下面に圧力差が与えられるとたわみが生じる。これにより歪が現れ、光弾性効果によって屈折率が変化する。ダイアフラム上に光導波路を設けておくと、その中を伝搬する光波に位相変化が生じる。この位相変化を光の干渉を利用して光強度変化として検出する。ここでは、干渉光回路として、導波形マッハツェンダ干渉形を２－３で述べた単一モードリブ形光導波路によって構成する。マッハツェンダ干渉形の平行導波路の一方をダイアフラム上に設け、圧力センシング用導波路とし、他方を圧力の影響を受けないように配置し、参照用導波路とする。干渉形の両分枝間の位相差を Φ とすると、合波、干渉後の出力は、

$$P_0=\frac{P_i}{2}\left\{\frac{(1-\sqrt{r_p})^2}{1+r_p}+4\frac{\sqrt{r_p}}{1+r_p}\cos^2\frac{\Phi}{2}\right\} \qquad (3-1)$$

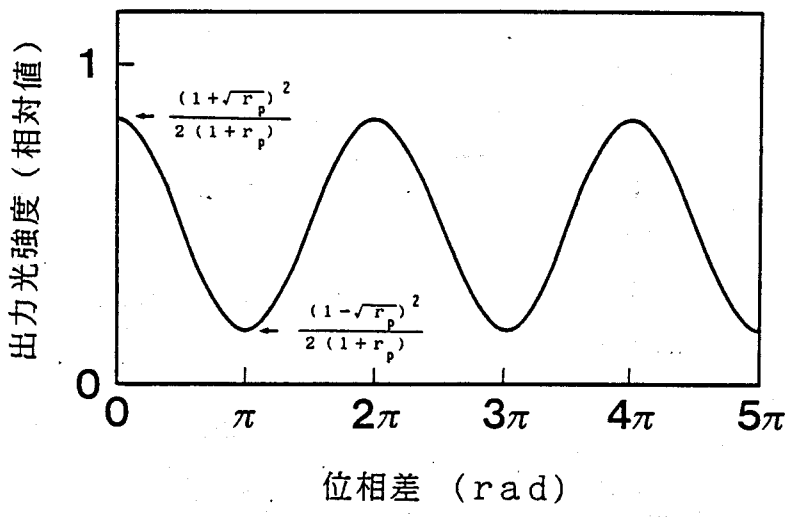


図３－２　マッハツェンダ干渉計の出力

となる[25]。ここで、r_p はパワー分割比で、入力Y分岐のところで、センシング用導波路と参照用導波路に分波される導波光のパワーの比である。図3－2は、式（3－1）から求めた位相差に対する出力光強度の変化を示したもので、光出力は位相差2πを周期として強弱を繰り返す正弦波状の変化となる。

3－3　動作解析

3－3－1　解析手順

ここでは、位相変化を利用するセンサの解析手法について述べる。まず、解析手順を図3－3に示す。まず、圧力差によって生じるダイアフラムのたわみを知るため、平板の平衡方程式を解き、そのたわみから曲げモーメント、ねじりモーメントおよびせん断力を求める。これらのモーメントおよび力からダイアフラム内部の応力が求められ、さらに、フックの法則から歪の分布を計算し、この歪分布より、光弾性係数を用いて誘電率（屈折率）変化を知ることができる。ところで、導波光に生じる位相変化量は、屈折率変化によるものと導波路の伸びによるものの和で与えられ、以上の解析より求められたたわみや屈折率変化から計算できる。位相変化は干渉計によって光強度変化に変換されるが、図3－1のようなマッハツェンダ干渉計を用いる場合、式（3－1）から出力光強度が求められる。以下では、個々の解析について述べる。

ダイアフラムのたわみ

ここで考えるセンサはダイアフラムの変形を利用して被測定量を検出するものである。その動作のもととなるダイアフラムのたわみは、次式で表される平板の平衡方程式から求められる[30]。

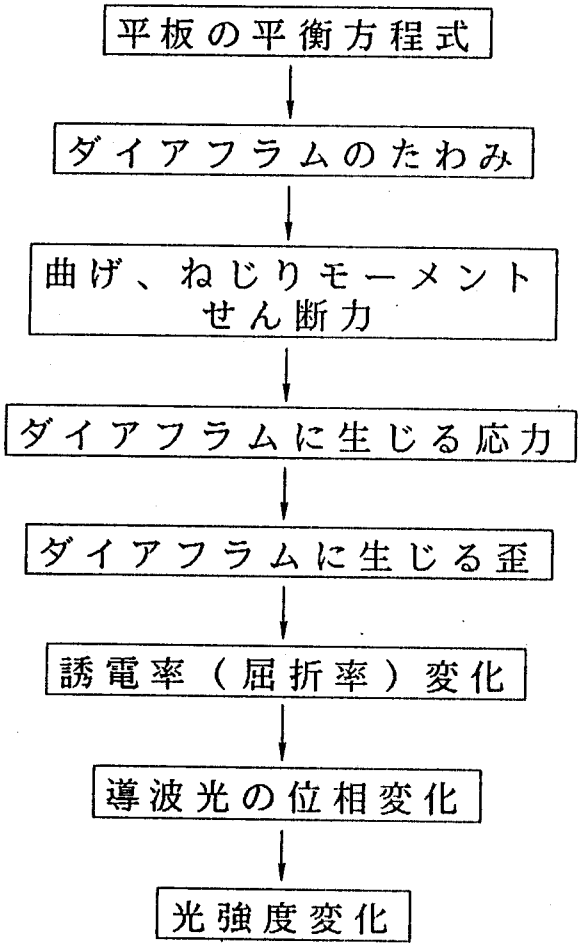

平板の平衡方程式
ダイアフラムのたわみ
曲げ、ねじりモーメント
せん断力
ダイアフラムに生じる応力
ダイアフラムに生じる歪
誘電率（屈折率）変化
導波光の位相変化
光強度変化

図３－３　解析手順

$$\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial y^2 \partial z^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial z^4}=\frac{p}{D} \qquad (3-2)$$

ただし、

w：たわみ

p：ダイアフラムに働く圧力

D：曲げ剛性

ここでは、たわみを求めるダイアフラムを図３－４に示す長方形の薄板とし、短辺の長さをａ、長辺の長さをｂ、厚さをｈとした。また、ダイアフラム面に垂直な方向をｘ軸とし、ｙ軸とｚ軸を図のようにダイアフラムの中心面にとった。

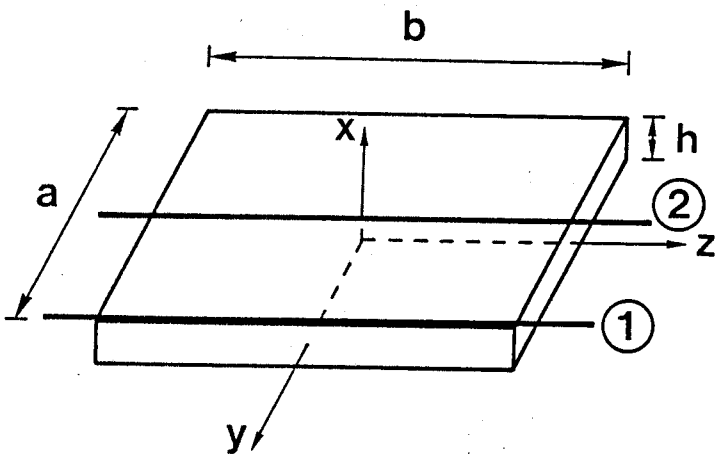


図３－４　解析の用いたダイアフラムの形状

応力分布

平衡方程式より求めたたわみから、ダイアフラムに生じる応力分布は次のように表される[31]。

$$T_1 = -\frac{3p}{4}\left\{\frac{2}{3} - \frac{2x}{h} + \frac{1}{3}\left(\frac{2x}{h}\right)^3\right\}$$

$$T_2 = -\frac{12M_y x}{h^3}$$

$$T_3 = -\frac{12M_z x}{h^3}$$

$$T_4 = -\frac{12M_{yz} x}{h^3} \qquad (3-3)$$

$$T_5 = \frac{3Q_z}{2h}\left\{1 - \left(\frac{2x}{h}\right)^2\right\}$$

$$T_6 = \frac{3Q_y}{2h}\left\{1 - \left(\frac{2x}{h}\right)^2\right\}$$

応力はテンソル量で、T_1、…、T_6は その成分であり、一般に、それぞれσ_x、σ_y、σ_z、 τ_{yz}あるいはτ_{zy}、τ_{xz}あるいはτ_{zx}、τ_{xy}あるいはτ_{yx}と書かれる。σ（T_1、T_2、T_3）は垂直応力、τ（T_4、T_5、T_6）はせん断応力を表し、第１の添字は応力の方向を、第２の添字は応力の作用する面がこの添字の示す軸に垂直であることを示す。例えば、σ_xはｘ方向の垂直応力、τ_{yz}はｚ軸と垂直な面に作用するせん断応力で、ｙ方向を向いていることになる。

（３－３）式中の、M_y 、M_z は曲げモーメント、M_{yz}はねじりモーメント、Q_y 、Q_z はせん断力と呼ばれ、次式で表される[31]。

$$M_y = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)$$

$$M_z = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)$$

$$M_{yz} = D(1-\nu)\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \qquad (3-4)$$

$$Q_y = -D\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)$$

$$Q_z = -D\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)$$

ただし、νはポアソン比である。

歪分布

応力と歪の間にフックの法則が成り立つものとすれば、歪分布は次のようにコンプライアンスを用いて計算できる[32]。

$$\mathbb{S}_i = \mathbb{s}_{ij} \mathbb{T}_j \qquad (i,j = 1,\cdots,6) \qquad (3-5)$$

ただし、

$\mathbb{s}_{ij}$ ：コンプライアンス
$\mathbb{S}_i$ ：歪テンソル
$\mathbb{T}_j$ ：応力テンソル

誘電率（屈折率）変化

ところで、導波光の位相変化には、屈折率変化によるものと導波路長の変化によるものがあり、これについては後で詳しく述べる。ここでは、前者の屈折率変化による位相変化量を求める上で必要となる誘電率変化（屈折率変化）を取り扱う。誘電率変化は、歪から光弾性係数を用いて導くことができ、次式によって与えられる[33]。

$$\Delta \varepsilon_i = -\varepsilon^2 q_{ij} \mathbb{S}_j \qquad (i,j = 1,\cdots,6) \qquad (3-6)$$

誘電率変化はテンソル量となり、次のように表される。

$$\begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_1 & \Delta\varepsilon_6 & \Delta\varepsilon_5 \\ \Delta\varepsilon_6 & \Delta\varepsilon_2 & \Delta\varepsilon_4 \\ \Delta\varepsilon_5 & \Delta\varepsilon_4 & \Delta\varepsilon_3 \end{pmatrix} \qquad (3-7)$$

誘電率変化テンソルのそれぞれの要素は導波光に与える効果が異なる。$\Delta\varepsilon_2$ はＴＥモードの位相変化を起こし、$\Delta\varepsilon_1$、$\Delta\varepsilon_3$、$\Delta\varepsilon_5$は ＴＭモードの位相変化を生じさせる。また、$\Delta\varepsilon_4$、$\Delta\varepsilon_6$はＴＥモードとＴＭモードを結合させ、ＴＥ－ＴＭモード変換を生じさせる。

位相変化量

ここでは、ダイアフラム上で光波に生じる位相変化について考察する。光波の位相変化は、誘電率（屈折率）の変化および導波路長の変化によって生じるが、まず、前者の誘電率（屈折率）変化による位相変化について考える。ここで、位相変化量を求める際の光波の伝搬方向はｚ方向とする。誘電率変化と導波光の電界はそれぞれダイアフラムの膜厚方向に分布をもち、このときの単位長さ当りの位相変化量は結合モード理論より導かれる自己結合項から求められ、次式で与えられる[34]。

$$\Delta\phi_{TE}=\frac{\omega\varepsilon_0}{4}\iint E_y^{*}\Delta\varepsilon_2 E_y\,dx\,dy$$

$$\Delta\phi_{TM}=\frac{\omega\varepsilon_0}{4}\iint E_x^{*}\Delta\varepsilon_1 E_x\,dx\,dy \qquad (3-8)$$

ここで、ωは光波の角周波数、ε_0は 真空中の誘電率であり、＊は複素共役を表す。また、E_x、E_yはそれぞれパワーを規格化したＴＭモード光の電界のｘ方向成分、ＴＥモード光の電界のｙ方向成分である。ＴＭモードについては、$\Delta\varepsilon_3$ 、$\Delta\varepsilon_5$ による寄与は無視した。誘電率（屈折率）変化によって、導波光がダイアフラム上で受ける位相変化量は、$\Delta\phi_{TE}$、

$\Delta\phi_{TM}$を光の伝搬方向、すなわちｚ方向に積分して、次式より求められる。

$$\Phi_m = \int_{-b/2}^{b/2} \Delta\phi_m(z)\,dz \qquad (m=TE、TM) \qquad (3-9)$$

次に、導波路長変化による位相変化量について考える。ダイアフラムのたわみによる導波路の伸びは次式で与えられる。

$$\Delta L = \int_{-b/2}^{b/2} \sqrt{1 + \left\{\frac{dw(z)}{dz}\right\}^2}\, dz - b \qquad (3-10)$$

ΔＬによって生じる位相変化量は次のように表される。

$$\Psi_m = \beta_m \Delta L \qquad (m=TE、TM) \qquad (3-11)$$

ここで、β_mは ＴＥモードあるいはＴＭモードの伝搬定数である。

ダイアフラム上で光波に生じる位相変化量は、以上の手順で求めた屈折率変化によるものと導波路長変化によるものの和で与えられる。

$$\Theta_m = \Phi_m + \Psi_m \qquad (m=TE、TM) \qquad (3-12)$$

ＴＥ－ＴＭモード変換

ところで、誘電率変化テンソルの$\Delta\varepsilon_4$、$\Delta\varepsilon_6$によって、ＴＥモードとＴＭモードの間に結合が生じ、パワーの移行が起こる。ここで考えるセンサは単一偏波で動作するため、ＴＥ－ＴＭモード変換はセンサの特性に悪影響を及ぼす。そこで、ここでは、モード変換について考察を行う。

ＴＥ－ＴＭモード変換を取り扱うための基本式となる結合モード方程式は、次式で表される。

$$\frac{d}{dz}A_e=-j\kappa_{em}A_m e^{i\Delta\beta z}$$

$$\frac{d}{dz}A_m=-j\kappa^{*}_{em}A_e e^{-i\Delta\beta z} \qquad (3-13)$$

ここで、A_e、A_mはＴＥ、ＴＭモードの(電界)振幅を表し、$\Delta\beta$は両モードの伝搬定数差である。また、κ_{em}は結合係数で次式で表される[34]。

$$\kappa_{em}=\frac{\omega\varepsilon_0}{4}\iint E^{*}_y\Delta\varepsilon_6 E_x\,dx\,dy \qquad (3-14)$$

ただし、$\Delta\varepsilon_4$に関する結合係数は、式（３－１４）の値に比べて十分小さく、そのモード変換への寄与は無視した。

例えば、式（３－１０）の方程式を初期条件$A_e(0)=1$、$A_m(0)=0$のもとで解くと、

$$|A_e(z)|^2 = 1 - F \sin^2 \gamma z$$

$$|A_m(z)|^2 = F \sin^2 \gamma z \qquad (3-15)$$

ただし、

$$\gamma = \sqrt{|\kappa_{em}|^2 + (\Delta\beta/2)^2} \qquad (3-16)$$

$$F = \frac{|\kappa_{em}|^2}{|\kappa_{em}|^2 + (\Delta\beta/2)^2} \qquad (3-17)$$

となる。Fは両モード間の最大パワー移行率を表し、結合係数と伝搬定数差で決まる。この値が十分に小さければ、すなわち、結合係数が伝搬定数差に比べて十分に小さければ、パワー移行量が少なく、ＴＥ－ＴＭモード変換によるセンサ性能への悪影響は無視できると言える。

３－３－２　圧力と光出力の関係

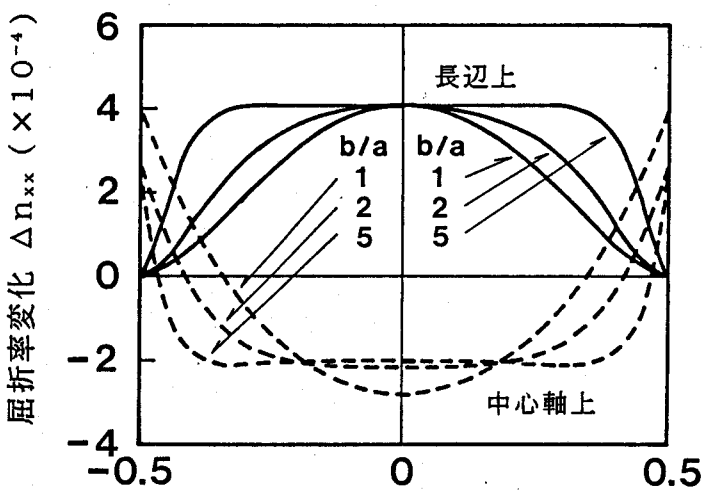
以上の解析手法に従い、センサの出力特性について考察した。ここでは、図３－４に示す長方形ダイアフラムを考え、その構成材料を二酸化シリコンとし、４辺は固定端とした。ただし、導波層となる部分の屈折率のみ、ガラスの値を用いた。光出力を解析するときの光の伝搬方向はｚ方向とし

た。また、ダイアフラムのたわみは、膜厚に比べ十分に小さいものと仮定した。

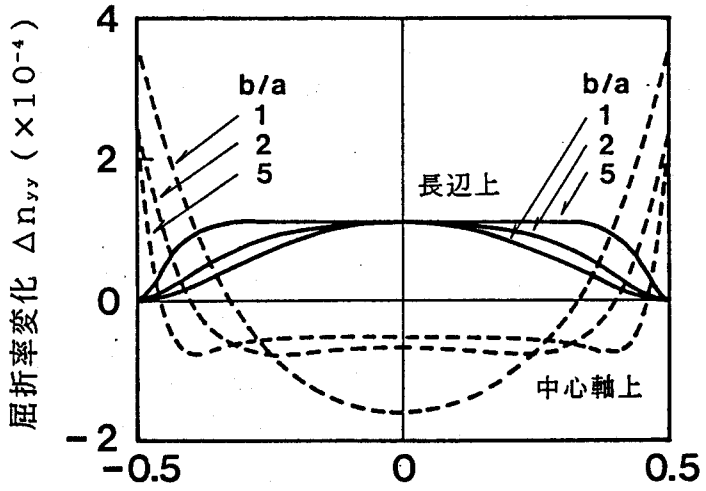
以上の条件や仮定のもとで、ダイアフラムのたわみを、付録Bに示した方法に従い解析的に求めた。4辺を固定端としたときのたわみは、2つの異なる境界条件のもとで導かれるたわみの重ね合わせで求められる。1つは4辺を単純支持端とした場合のたわみで、もう1つは辺上での曲げモーメントの分布が既知である場合のたわみである。このたわみから、式（3－3）によりダイアフラム内部に生じる応力を得、まず、付録Dに示したコンプライアンスの値を用いて歪を計算し、次に、光弾性係数の値（付録D）を用いて誘電率変化を求めた。

ところで、誘電率（屈折率）変化はダイアフラム上で位置の関数になるため、導波路を形成する場所により、光波に生じる位相変化量が大きく変化する。そこで、ここでは、導波路を形成する場所として大きな屈折率変化が得られる長辺上①と中心軸上②を考え、導波光に誘起される位相変化量について考察した。

導波光がダイアフラム表面に閉じ込められている場合、導波光の受ける位相変化は、ダイアフラム表面に生じる屈折率変化により評価できる。図3－5（a）はTMモードに対する、（b）はTEモードに対するダイアフラム表面の屈折率変化の計算結果である。ここで、ダイアフラムに働く圧力差は次節で考察するダイアフラムの耐圧に等しいとした。ダイアフラムの長辺と短辺の比（以下、アスペクト比と呼ぶ）をパラメータとし、この比が1、2、5の場合について示してある。アスペクト比が無限大の場合には、屈折率変化はz方向に一定となる。図より、TMモードに対する屈折率変化の方が、TEモードより4倍程度大きな値となっていることが分かる。また、導波路を長辺上に設ける方が、中心軸上に比べ約2倍大きくなっている。さらに、導波路長の変化による位相変化についても考察する必要がある。導波路を長辺上に形成した場合には、4辺が固定となっているため、たわみは起こらず、導波路長は変化しない。一方、中心軸上の



（a） TMモード光に対する屈折率変化



（b） TEモード光に対する屈折率変化

図３－５ 長辺上および中心軸上でのダイアフラム表面の屈折率変化

場合には、たわみが生じるため導波路長の変化を考慮する必要があるが、計算より、これによる影響は無視できることが分かった。したがって、導波路を長辺上に設け、導波モードとしてＴＭモードを利用するのが圧力に対する位相変化量が大きく有利であると言える。

導波路を長辺上に設けた場合について、解析を進め、式（３－８）と式（３－９）の積分を行い、ダイアフラム上で光波に誘起される位相変化量を求めると、次のようになる。

$$\Theta_{TE}[\mathrm{rad}] = \Gamma_{TE} \cdot 7.95\times10^{-9} \left(\frac{a[\mu m]}{h[\mu m]}\right)^2 b[mm]\,p[Pa]$$

$$\Theta_{TM}[\mathrm{rad}] = \Gamma_{TM} \cdot 2.97\times10^{-8} \left(\frac{a[\mu m]}{h[\mu m]}\right)^2 b[mm]\,p[Pa] \qquad (3-18)$$

ここで、Θ_{TE}とΘ_{TM}はそれぞれＴＥモード光とＴＭモード光に生じる位相変化量である。また、Γ_{TE}およびΓ_{TM}は低減係数で、次式で表わされる。

$$\Gamma_{TE} = \iiint E_y^* \frac{\Delta\varepsilon_2(x,y,z)}{\Delta\varepsilon_{2(max)}} E_y \, dx\,dy\,dz$$

$$\Gamma_{TM} = \iiint E_x^* \frac{\Delta\varepsilon_1(x,y,z)}{\Delta\varepsilon_{1(max)}} E_x \, dx\,dy\,dz \qquad (3-19)$$

ここで、$\Delta\varepsilon_{1(max)}$および$\Delta\varepsilon_{2(max)}$は、ダイアフラムの長辺中央の表面（$x=h/2$、$y=\pm a/2$、$z=0$）に生じる誘電率変化である。また、z方向の積分範囲は$-b/2$から$b/2$までとする。ところで、式（3－1-8）の係数を見ると、TMモードの方が、TEモードに比べ4倍程度大きな値となっており、大きな位相変化量が得られることが分かる。

最後に、センサの特性に悪影響を及ぼすTE－TMモード変換について考察する。モード変換によるTEモードとTMモード間のパワー移行量は式（3－17）のFの値で決まり、結合係数と両モードの伝搬定数差に関係する。式（3－14）より求められる結合係数に比べ、伝搬定数の差が大きく、3－3－3で述べるダイアフラムの耐圧に相当する圧力差を加えた場合でも、一方のモードから他方のモードへ移行するパワーは －20dB以下と見積られ、TE－TMモード変換のセンサ特性への影響は無視できる。

3－3－3 ダイアフラムの耐圧

ダイアフラムに過度の圧力差を加えると、ダイアフラム内に生じる応力にその構成材料が耐えられなくなり、薄膜は破壊されて圧力計測ができなくなる。そこで、ここではダイアフラムの耐圧について考察する。

ダイアフラム内部に生じる応力は、長方形ダイアフラムの場合、その長辺中央（図3－4の$y=\pm a/2$、$z=0$）の薄膜表面上で最大となり、その最大応力は次式で与えられる[30]。

$$T_2=\sigma_y=\pm\frac{6ka^2}{h^2}p \qquad (3-20)$$

ここで、kはアスペクト比に依存する係数である。この応力がダイアフラムを構成する材料固有の曲げ強さを越えたとき、薄膜は破壊されるものと考えるとダイアフラムの耐圧は次式で与えられる。

$$p_{max} = \frac{\sigma_b h^2}{6 k a^2} \qquad (3-21)$$

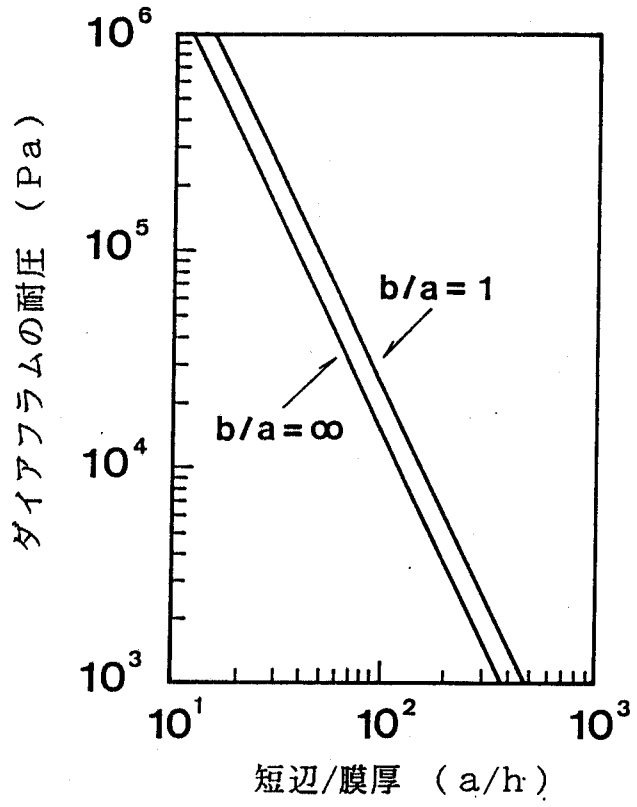


図3－6　ダイアフラムの耐圧

ここで、σ_b はダイアフラムを形成する材料の曲げ強さである。図３－６は式（３－２１）より求めたダイアフラムの耐圧の計算結果である。計算では、σ_b に二酸化シリコンの曲げ強さ ６.９×１０^7 Ｐａ （７００ ｋｇ/ｃｍ^2）[35]を用いた。図には、アスペクト比が１と無限大の場合について示してある。この比が２以上の場合は、比を無限大としたときの耐圧にほぼ一致する。図より、耐圧は、ダイアフラムの短辺の長さと膜厚に強く依存することが分かる。

３－４　試作、実験

３－４－１　設計及び試作

ダイアフラム構造を用いた光導波形圧力センサの基本動作を確認するため、センサの設計、試作および実験を行った。設計では、１×１０^5 Ｐａ（約１気圧）の圧力変化に対して、波長 ０.６３μｍのＴＭモード光に２π以上の位相変化が生じるように、すなわち、干渉光出力の一周期分以上の変化が起こるように半波長圧力差を設定することにし、ここでは、０.２５×１０^5 Ｐａ とした。また、ダイアフラムの耐圧はできる限り高くするのが望ましく、ここでは、２×１０^5 Ｐａとした。

まず、図３－６においてｂ／ａ＝∞の場合を考え、設計耐圧 ２×１０^5 Ｐａから短辺と膜厚の比を２７と決めた。膜厚はシリコンと導波路の膜厚を考慮して８μｍとした。したがって、ダイアフラム短辺の長さは２２０μｍとなる。さらに、式（３－１８）のＴＭモードの式に、半波長圧力差の設計値 ｐ＝０.２５×１０^{5}Ｐａ、$\Delta\phi_{TM}=\pi$、$\Gamma_{TM}=$ ０.８を代入し、ダイアフラム長辺の長さを７ｍｍと決定した。

図３－７に、今回行った作製のプロセスを示す。また、表３－１は各プロセスの条件を示している。ここでは、素子を作製する基板として、シリ

コン表面にイオン注入により 厚さ０．８５μｍ（計算値）の高濃度ボロンドープ層（p^+ 層）を形成し、さらに、その上にシリコンを５μｍエピタキシャル成長させたものを使用した。まず、電子ビーム露光装置で、異方性エッチング用の長方形のパターンをレジストに転写するための紫外線露光用Ｃｒマスクを作製した。次に、シリコンを１０００℃で１時間加湿酸化し、０．３ μｍの酸化膜を形成した。さらに、光導波路を作製する側のシリコン表面を異方性エッチングから保護するために、その面の熱酸化膜上にクロムを蒸着した。その後、シリコンの裏面にフォトレジスト Ａｚ-

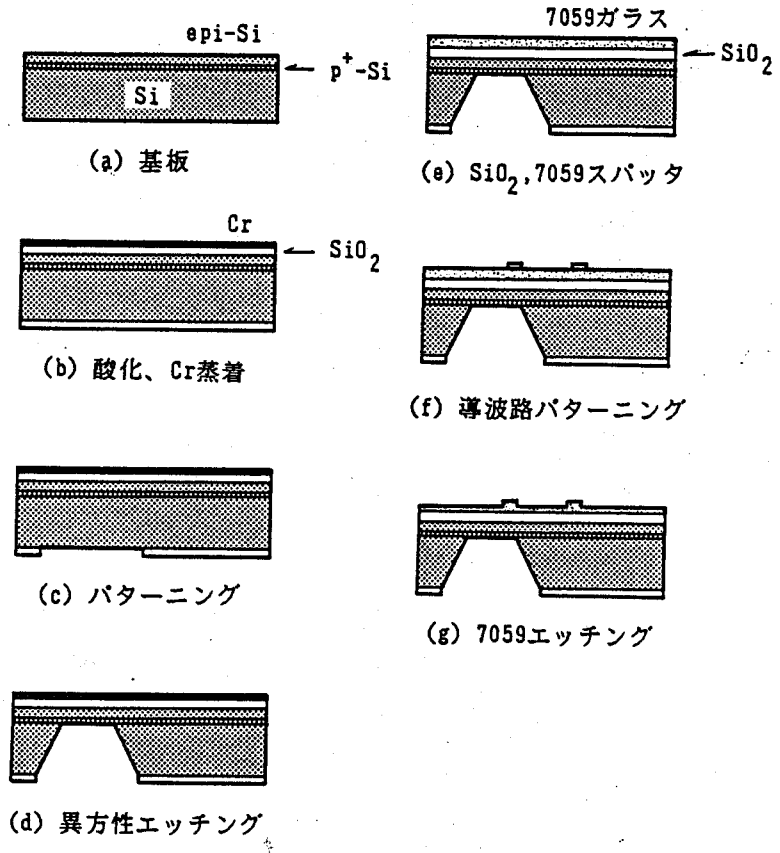


図３－７　作製プロセス

１３５０Ｊを回転塗布し、フォトリソグラフ法により、長方形の異方性エッチングパターンをレジストに転写した。そのレジストをマスクにして緩衝フッ酸を用いて、二酸化シリコンをエッチングした。

このパターン化された二酸化シリコンをマスクにして、シリコンを裏面より異方性エッチングし、ダイアフラムを作製した。エッチング液には、エチレンジアミン、ピロカテコール、水の混合液を使用し、液温１１０℃

表３－１　作製条件

基板	(１００)Ｓｉ	厚さ　４００μｍ
	ｐ⁺層（Ｂをイオン注入）	０.８５μｍ
	エピタキシャル層	５μｍ
異方性エッチング用マスク材料	SiO_2(加湿酸化)	温度　１０００℃、１時間
		膜厚　０.３μｍ
	Ｃｒ(電子ビーム蒸着)	０.１μｍ
SiO_2エッチング	緩衝フッ酸によるウェットエッチング	７分間
	４０％フッ化アンモニウム水溶液と	
	５０％フッ酸を７：１に混合	
異方性エッチング	エチレンジアミン　６８ｍｌ	
	ピロカテコール　１２ｇ	温度　１１０℃
	水　３２ｍｌ	
光導波路（スラブ）	バッファ層(SiO_2)	膜厚　１.８μｍ(スパッタ)
	導波層(7059ガラス)	１.２μｍ(スパッタ)
光導波路（リブ形）	７０５９ガラスエッチング	段差　０.１４μｍ
	CHF_3ガスによる反応性イオンエッチング	

で、撹拌しながらエッチングを行った。ところで、エッチング時には、窒素ガスを液中に通すのが一般的であるが、ここでは、それは行わなかった。エッチングの進行は p^+層で止まるため、厚さ５μｍのシリコン薄膜がダイアフラムとして残る。

ダイアフラム作製後、その寸法を測定し、それをもとにマッハツェンダ干渉計の導波路パターンを設計し、紫外線露光用のＣｒマスクを作製した。次に、ダイアフラムを形成した基板上に、導波路のバッファ層として二酸化シリコンを １.８μｍ、さらに、導波層として７０５９ガラスを １.２μｍスパッタした。その上に、フォトレジストを塗布し、露光および現像を行い、マッハツェンダ干渉計の導波路パターンをレジストに転写した。これをマスクにして、CHF_3ガスによる反応性イオンエッチングを行い、ガラス層に０.１４μｍの段差をつけ、リブ形構造の光導波路を作製した。

図３－８と図３－９は、実際に試作したセンサのダイアフラムの断面図とマッハツェンダ干渉計の導波路パターンである。ダイアフラムの幅は２２０μｍで、その厚さは８μｍであった。また、干渉計を構成する導波路の幅、間隔および分岐角は、それぞれ３.６μｍ、６０μｍ、1/１００ｒａｄで、導波路の平行部の長さは １１.３ｍｍであった。設計では、長辺の長さ７ｍｍの細長いダイアフラムを考えていたが、実際に２２０μｍ幅のものを正確につくることが困難であった。そこで、図３－１０のように長さ　約１ｍｍ、幅　２２０μｍの長方形ダイアフラムを７個直線状に並べて、作用長を７ｍｍとした。

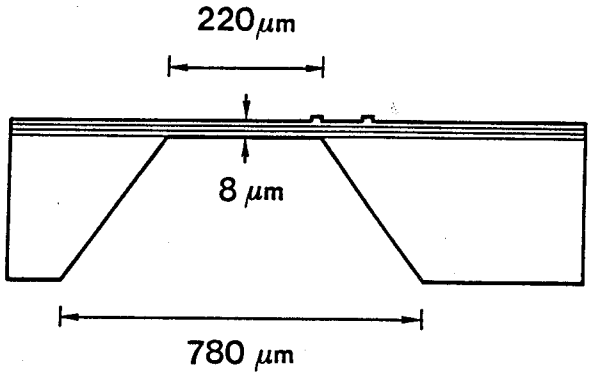


図３－８　試作したダイアフラムの断面

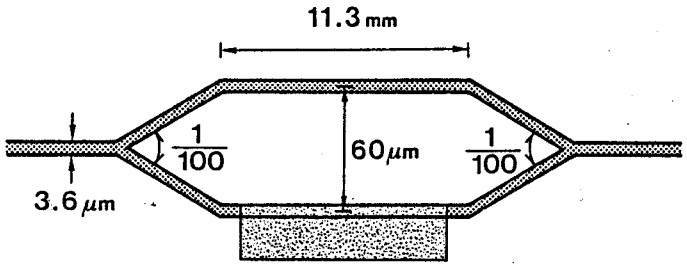


図３－９　マッハツェンダ干渉計の導波路パターン

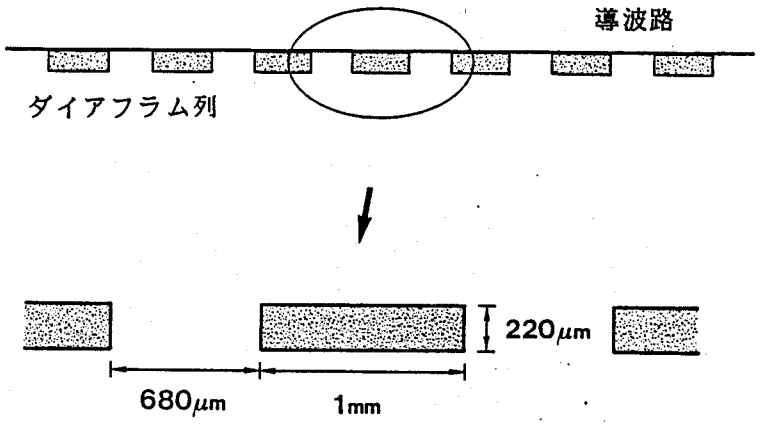


図３－１０　試作したダイアフラム列

３－４－２　動作実験

試作したダイアフラムに圧力差を与えた時の出力光強度変化を測定した。図３－１１はその測定系である。光源として 波長 ０.６３μｍのＨｅ－Ｎｅレーザを使用し、ＴＥモード光に比べ高感度の期待されるＴＭモード光を導波路端面から入射した。図３－１２はダイアフラムに圧力を印加す

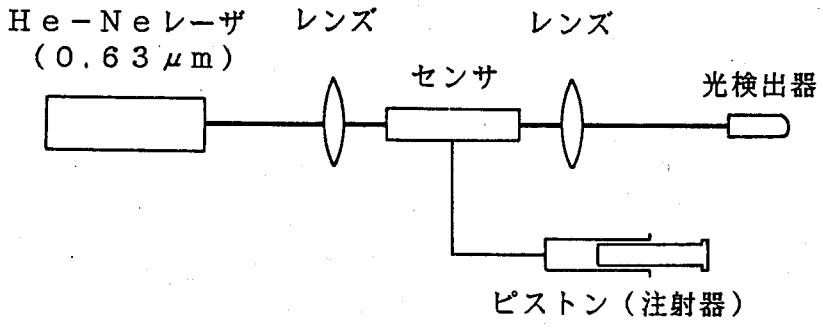


図３－１１　測定系

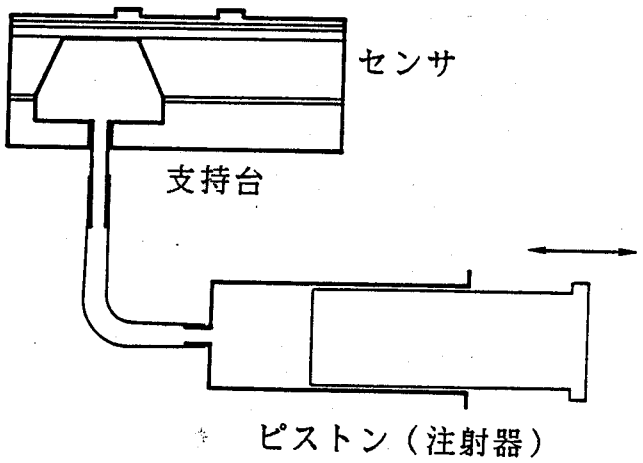


図３－１２　圧力印加法

る構成である。センサのシリコン表面（導波路を作製した面）は大気圧とした。異方性エッチング後の空洞は密閉し、シリコーンチューブを介してピストンにつなぎ、その出し入れにより空洞内の圧力を減圧、加圧し、ダイアフラム薄膜の表面と裏面に圧力差を与えた。その圧力差はピストンの平衡位置からの変位量より換算し求めた。

図３－１３は圧力差に対する出力光強度の測定結果である。正の圧力差は空洞内部が加圧された場合に、負の圧力差は減圧された場合に相当する。図より、出力が最大から最小まで変化するのに必要な圧力差、すなわち、半波長圧力差は ０.８×１０^{5} Ｐａであることが分かる。圧力差 －０.５×１０^{5} ～ ０.３×１０^{5} Ｐａの範囲で、出力に対し圧力差が一義的に決

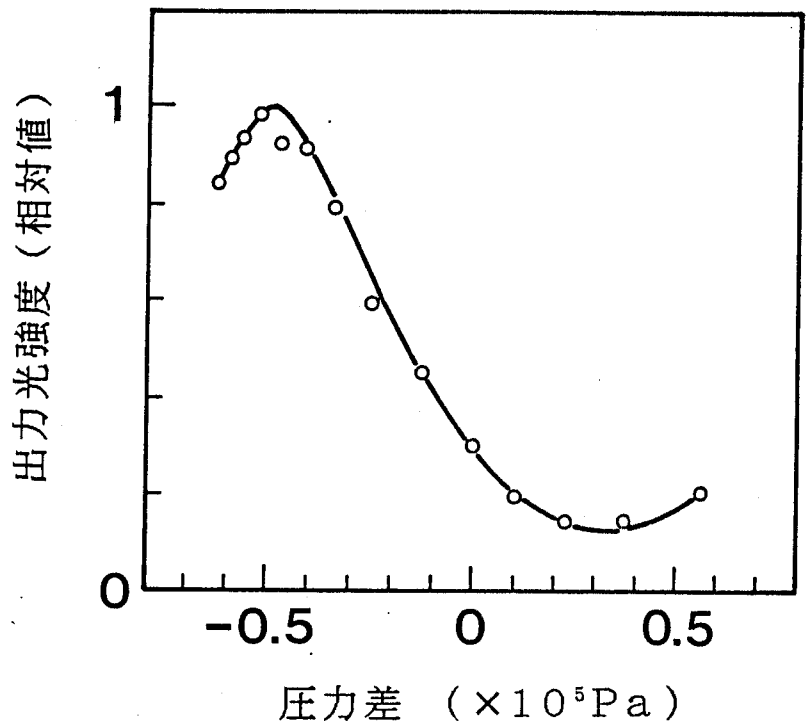


図３－１３　測定結果

まり圧力計測を行うことが可能であると言える。また、大きな圧力差を加えていくと、さらに、強弱を繰り返す出力パターンが得られるものと考えられるが、この山の数を数えることにより測定可能範囲が広がるものと期待される。

ところで、ダイアフラムを二酸化シリコンからなる単層とすると、半波長圧力差は 0.29×10^5 Paと見積られ、これは実験で得られた値の約1／3である。この違いの原因として、まず試作したセンサのセンシング用導波路がダイアフラムの端からずれたことが考えられる。図3－14は、ダイアフラムと導波路の顕微鏡写真で、導波路のずれは10μmであった。したがって、導波路をダイアフラムの端に沿って設けたときより屈折率変化が小さくなり、計算によると、半波長圧力差が1.4倍程度大きくなると見積られる。

また、試作したセンサでは、ダイアフラムはガラス、二酸化シリコン、シリコンからなる3層構造であるが、計算では、二酸化シリコンの単層としたことも原因の1つと考えられる。シリコンは硬い材料であり、ダイア

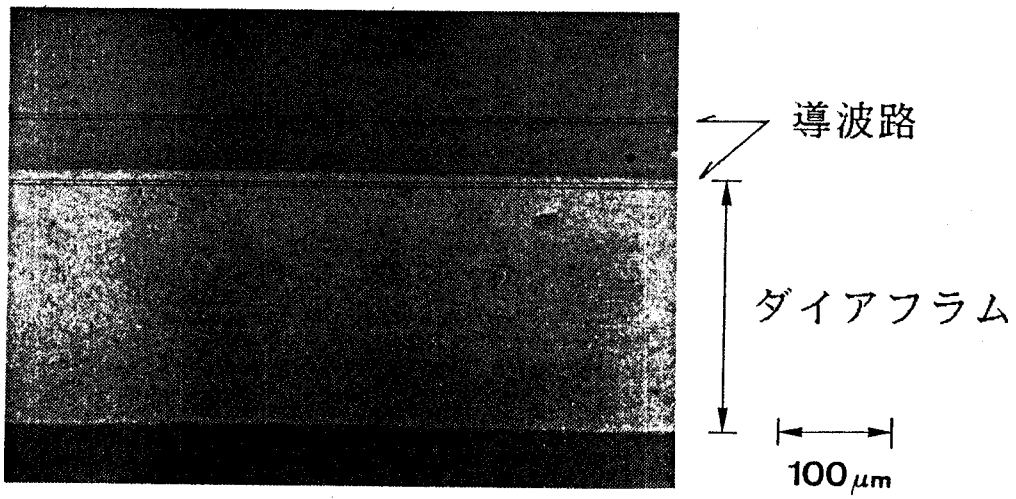


図3－14　ダイアフラムと導波路の顕微鏡写真

フラムはたわみにくく、したがって、屈折率変化が小さくなり、半波長圧力差は大きくなるものと考えられる。そこで、シリコンの影響を評価するため、まず、ダイアフラムをすべてシリコンと考え、たわみを求め、そのたわみが二酸化シリコンのダイアフラムに生じたとし半波長圧力差を求めた。その結果、半波長圧力差は二酸化シリコンの単層とした時に比べ、約２倍大きくなると見積られる。

ところで、圧力差がないとき、光強度は最大となるはずであるが、測定結果を見ると最大点は -0.5×10^{5} Ｐａまで移動している。これは、マッハツェンダ干渉計が光学的にバイアスされたからと考えられるが、ダイアフラムの下のシリコンを取り除くことにより、導波路に生じていた内部応力が開放され、一方参照導波路には内部応力が開放されず残ったためと考えられる。

また、加圧時と減圧時の出力変化に関して、測定結果には非対称が見られる。これは、試作したセンサでは、シリコン基板がダイアフラムを下から支え、固定した構造となっており、解析で仮定したような４辺固定端となっていないためではないかと考えている。

消光比は、最大強度と最小強度の比を表すものであるが、測定結果より１０ｄＢであった。消光比が悪い原因は、マッハツェンダ干渉計の入力のＹ分岐で導波光が１：１に分波されなかったためか、センシング用導波路と参照用導波路での損失が違ったためと考えられる。

今回の測定では、ダイアフラムに加えた圧力差が小さく、破壊される圧力差は実測できなかった。

３－５　結言

本章では、シリコン微細構造として、ダイアフラム構造を利用した光集積回路センサについて述べた。ダイアフラムの表面と裏面に圧力差が与え

られると変形が生じる。この変形を導波光の位相変化を利用して検出するものである。位相変化は直接検出できないので、ここでは、マッハツェンダ干渉計を使って、光強度変化に変換した。光集積回路構成の利用により、小型化、軽量化され、さらに電磁雑音や可燃性ガスなどが存在する悪環境化でも安定で信頼性の高い計測が期待される。

まず、センサの構成と原理を示した。次に、センサの実現性の考察、及び設計を行うために動作解析を行った。解析の結果、導波路をダイアフラムの長辺上に沿って設け、導波モードとしてＴＭモードを利用するのが、圧力差に対する位相変化量が大きくなり有利であることが分かった。さらに、基本動作の確認のため、圧力センサを設計、試作した。動作実験の結果、干渉出力が得られ、そのときの半波長圧力差は 0.8×10^{5} Ｐａであった。また、消光比は１０ｄＢであった。-0.5×10^{5} Ｐａ～0.3×10^{5} Ｐａの圧力範囲で出力に対して圧力差が一義的に決まり、圧力測定が行えることを確認した。さらに圧力差を増して行けば、出力は強弱を繰り返すものと考えられ、その山や谷の数を数えることによってダイナミックレンジを拡大することができる。

第４章　カンチレバ構造を利用した光集積回路センサ

４－１　序論

本章では、カンチレバ構造を利用した光集積回路センサを取り扱う。カンチレバとは一端が基板に固定された梁状の構造であり、他端は自由に変動できる。外力（被測定量）により生じるカンチレバの変形を第３章で述べたセンサと同様に、導波光の位相変化として検出するものである。

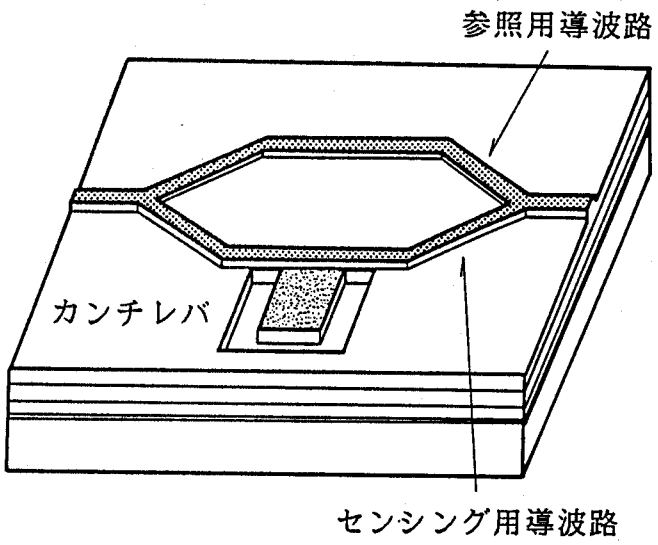
これまで、カンチレバ構造を利用したデバイスとして、もちろん、光を利用したものではないが、超音波センサ[36]、加速度センサ[37]、機械式のスイッチ[38]などが開発されている。

ここでは、カンチレバ構造を用いた光集積回路センサを提案すると共に、具体例として加速度計測と流量計測への適用法について考察する。振動計測の中でも、加速度計測を対象としたものは多く、例えば、工作機械の振動試験や自動車用など多岐にわたる。また、カンチレバ構造を利用した流量計は、これまでに報告がなく、新しい利用法と言える。これらのセンサは先のダイアフラム構造を用いたセンサと同様に、無誘導性、防爆性などの特徴を有し、さらに信頼性の高い計測が実現できるものと期待される。

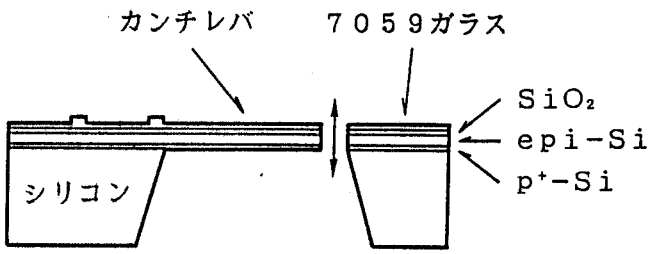
以下では、センサの基本構成とその原理を示し、その解析法と解析結果について述べる。そして、その構造を加速度センサと流量センサに適用する方法について述べ、その実現性を考察する。さらに、流量センサについては、基本動作を確認するため、解析結果をもとに設計および試作を行い、動作実験を行ったのでその結果について述べる。

４－２　素子の構成及び動作原理

図４－１は本章で考えるセンサの概形と断面図である。第３章で述べたセンサのダイアフラムをカンチレバに置き換えた構成となっている。カンチレバとは図示のような片持ち梁のことで、一方は固定され、他方は自由



（a）　概形



（b）　断面図

図４－１　カンチレバ構造を利用した
光集積回路センサ

に変動できる構造となっている。カンチレバに力が加わると、レバは弓状にたわむ。このような変形が起こると、歪が生じ、屈折率が変化する。この屈折率変化はカンチレバの付け根部分で最大となるので、この部分に沿って導波路を設けることにすると、その中を伝搬する光波に大きな位相変化が生じる。この位相変化を、前章と同様に、マッハツェンダ干渉計を用いて光強度変化に変換して検出する。干渉計の平行導波路の一方をカンチレバの付け根に沿って設け、センシング用導波路とし、他方をカンチレバの変形による影響を受けないように配置し、参照用導波路とする。干渉計からの出力は、位相変化に対して、図３－２に示したように位相差２πを周期として強弱を繰り返す正弦波状の変化となる。

測定したい物理量、化学量により、効率よく力がカンチレバに働くようにセンサの構成を工夫すれば、様々な測定対象に対して計測が可能となる。

４－３　動作解析

ここでは、カンチレバ構造を利用した光集積回路センサの解析手法と、動作解析を行った結果について述べる。解析は、３－３－１で述べた手順に従い、まず、カンチレバのたわみを求め、このたわみより応力および歪を計算し、次に、以上の結果をもとに光波に生じる位相変化量、さらに光強度変化を求めた。図４－２は解析に用いたカンチレバの形状である。カンチレバ面に垂直な方向をｘ軸とし、ｙ軸とｚ軸を図のようにカンチレバの中心面にとった。ここでは、カンチレバの長さをＬ、幅をW、厚さをＨとした。また、カンチレバ全面に、一様に、圧力ｐが働くものとした。

カンチレバのｘ方向のたわみ ｗ を記述する平衡方程式は次式で表される[39,40]。

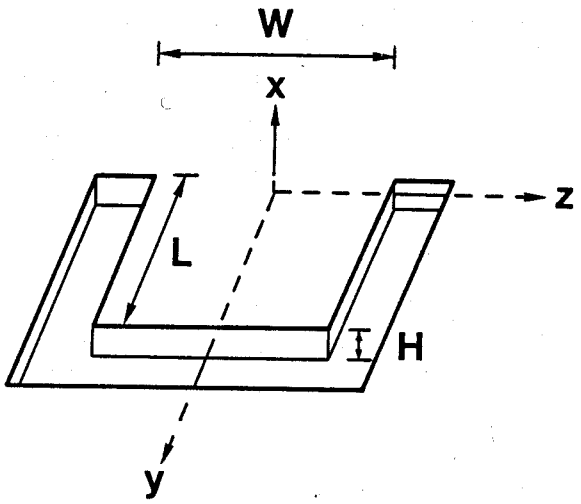


図４－２　解析に用いたカンチレバの形状

$$EI\frac{d^4w}{dy^4}=-pW \qquad (4-1)$$

ただし、

E：ヤング率

I：断面２次モーメント

p：カンチレバに働く圧力

この方程式を、カンチレバの付け根における条件 w＝０および∂w／∂y＝０のもとで解けば、カンチレバのたわみを求めることができる(付録C)。

たわみより導かれる応力の主成分は、y方向の垂直応力 T_2で、次のよ

うに表される。

$$T_2 = \frac{M_y}{I} x \qquad (4-2)$$

ここで、M_y は曲げモーメントと呼ばれ、次式で定義される。

$$M_y = -\frac{1}{EI} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \qquad (4-3)$$

その他の応力成分（T_1、T_3、T_4、T_5、T_6）は、0あるいは十分に小さな値であり、無視できる。

さらに、応力と歪の間にフックの法則が成り立つとするならば、コンプライアンス（付録D）を用いて歪は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} S_1 &= \wp_{12} T_2 \\ S_2 &= \wp_{11} T_2 \\ S_3 &= \wp_{12} T_2 \end{aligned} \qquad (4-4)$$

ここで、S_1、S_2、S_3は それぞれx、y、z方向の垂直歪である。

この歪から光弾性係数（付録D）を用いて屈折率変化を求めた。TMモ

ード光に対する屈折率変化は、

$$\Delta n_{xx} = \frac{1}{2} n^3 (p_{11} \sigma_{12} + p_{12} \sigma_{11} + p_{12} \sigma_{12}) T_2 \qquad (4-5)$$

ＴＥモード光に対する屈折率変化は、

$$\Delta n_{yy} = \frac{1}{2} n^3 (p_{11} \sigma_{11} + 2 p_{12} \sigma_{12}) T_2 \qquad (4-6)$$

で与えられる。ただし、ｎは屈折率である。

図４－３は式（４－５）および式（４－６）より求めたカンチレバ付け根の表面（ｘ＝Ｈ／２、ｙ＝０）に現れる屈折率変化である。計算では、カンチレバを構成する材料として、二酸化シリコンを考え、その長さを３ｍｍ、厚さを１０μｍとした。ただし、屈折率のみ、導波層となる部分にはガラスの値を用いた。Δn_{xx}の方がΔn_{yy}に比べて大きく、したがって、導波モードとしてＴＭモードを利用するのが有利であると言える。圧力２５０Ｐａで、カンチレバは内部に生じる応力に耐えられなくなり破壊されるものと考えられる。ところで、屈折率変化は圧力に比例しているが、これは応力と歪が比例すると仮定したことによる。実際には、圧力の大きい（降伏限界を越えた）ところでは、応力と歪は比例しなくなり、したがって、屈折率変化も圧力に比例しないものと考えられる。

次に、カンチレバの付け根を通過する（ｚ方向に伝搬する）導波光に生

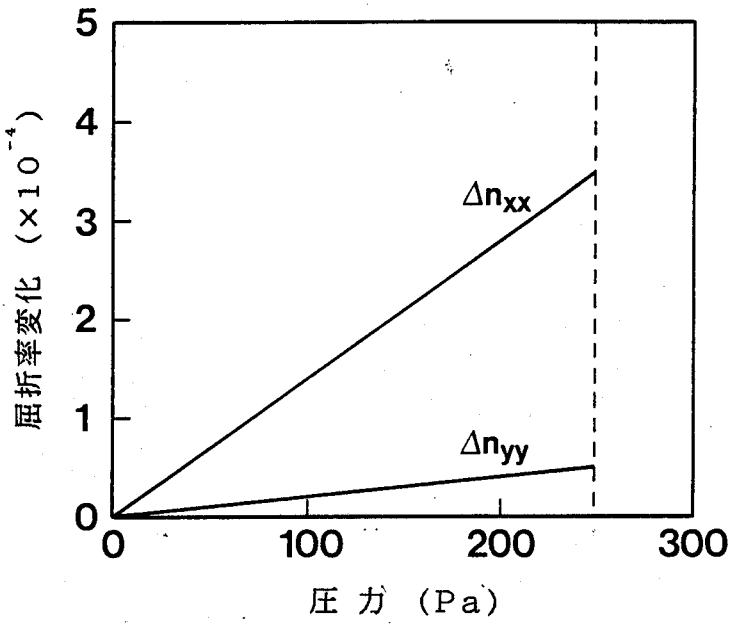


図４－３　カンチレバ付け根の表面に現れる
屈折率変化

じる位相変化量を導出する方法を考察する。位相変化は、導波路長の変化および屈折率変化によって生じる。カンチレバの付け根部分においては、その部分が基板に固定されているため、導波路長の変化は起こらない。したがって、位相変化量を求める際には、屈折率変化による位相変化のみ考慮すればよい。カンチレバの付け根に生じる誘電率(屈折率)変化は、歪分布を式（３－６）に代入して求められる。単位長さ当りの位相変化量は、第３章と同様に次式で与えられる。

$$\Delta\phi_{TE}=\frac{\omega\varepsilon_0}{4}\iint E_y^{*}\Delta\varepsilon_2 E_y\,dx\,dy$$

$$\Delta\phi_{TM}=\frac{\omega\varepsilon_0}{4}\iint E_x^{*}\Delta\varepsilon_1 E_x\,dx\,dy \qquad (4-7)$$

ここで、ωは光の角周波数で、ε_0は 真空中の誘電率であり、＊は複素共役を表す。また、E_x、E_yは、それぞれパワーを規格化したＴＭモード光の電界のｘ方向成分とＴＥモード光の電界のｙ方向成分である。光の伝搬方向には屈折率変化は一定と考えられ、したがって、全位相変化量は、

$$\Theta_m=\Delta\phi_m W \qquad (m=TE,TM) \qquad (4-8)$$

となる。

以上の解析から、カンチレバを通過する光波に生じる位相変化量は次式で与えられる。

$$\Theta_{TE}[rad]=\Gamma_{TE}\cdot 2.18\times10^{-2}\left(\frac{L[\mu m]}{H[\mu m]}\right)^2 W[mm]p[Pa]$$

$$\Theta_{TM}[rad]=\Gamma_{TM}\cdot 1.52\times10^{-1}\left(\frac{L[\mu m]}{H[\mu m]}\right)^2 W[mm]p[Pa] \qquad (4-9)$$

ここで、Θ_{TE}とΘ_{TM}はそれぞれＴＥモード光とＴＭモード光に誘起される位相変化量であり、Γは０～１の値をとる低減係数で、次のように表される。

$$\Gamma_{TE} = \iint E_y^* \frac{\Delta\varepsilon_2(x,y)}{\Delta\varepsilon_{2(max)}} E_y \, dx\,dy$$

$$\Gamma_{TM} = \iint E_x^* \frac{\Delta\varepsilon_1(x,y)}{\Delta\varepsilon_{1(max)}} E_x \, dx\,dy \qquad (4-10)$$

ここで、$\Delta\varepsilon_{1(max)}$および$\Delta\varepsilon_{2(max)}$は、カンチレバの付け根表面（ｘ＝Ｈ／２、ｙ＝０）に生じる誘電率変化である。ところで、式の係数を見ると、ＴＭモード光を用いる方が、ＴＥモード光より約７倍大きな値となっており、大きな位相変化が得られることが分かる。

４－４　加速度センサ

４－４－１　加速度と光出力の関係

物体が加速度運動すると慣性力が働くが、この慣性力をカンチレバに効率よく与えることができれば、加速度センサとしての動作が期待できる。カンチレバは通常薄板状のもので、質量が軽く、加速度による慣性力は小さい。そこで、カンチレバに効率よく慣性力を働かせるために、おもりを装荷する必要がある。ここでは、図４－４に示すようにカンチレバの下のシリコンをエッチング時に残し、それをおもりとすることを考えた。

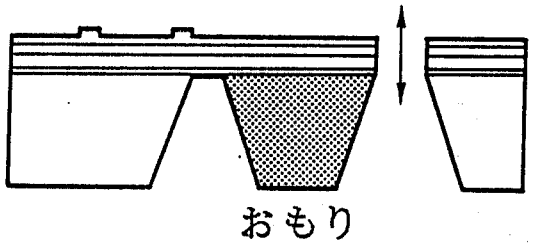


図４－４　加速度センサの構成

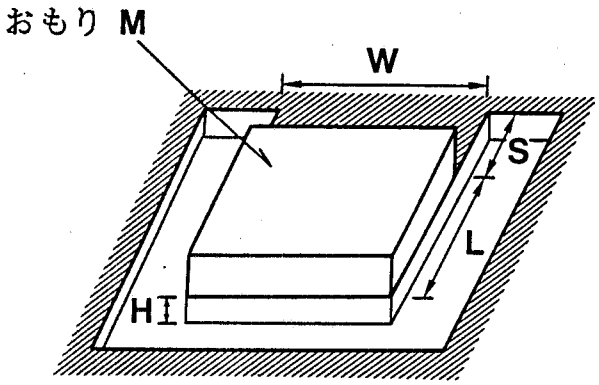


図４－５　解析に用いたカンチレバの形状

おもりによる感度の向上を調べるため、導波光に生じる位相変化量および半波長加速度について考察した。光出力の様子は位相変化量が分かれば、式（３－１）より得られる。

図４－５は解析に用いたカンチレバの形状で、おもりはカンチレバの上に装荷してあり、変形しないものとした。カンチレバの幅、厚さをW、Hとし、おもりを装荷している部分としていない部分のカンチレバの長さをそれぞれL、Sとした。また、おもりの質量をMとした。カンチレバに働

く単位面積当りの力は次のように表される。

$$p = \frac{M}{LW}\alpha \qquad (4-11)$$

ここで、αはセンサに働く加速度である。これを、式（４－９）に代入することにより、位相変化量が求められる。

光の半波長に相当する位相πのリターデーションを得るのに必要な加速度を半波長加速度という。出力光強度変化は、この半波長加速度で最大か

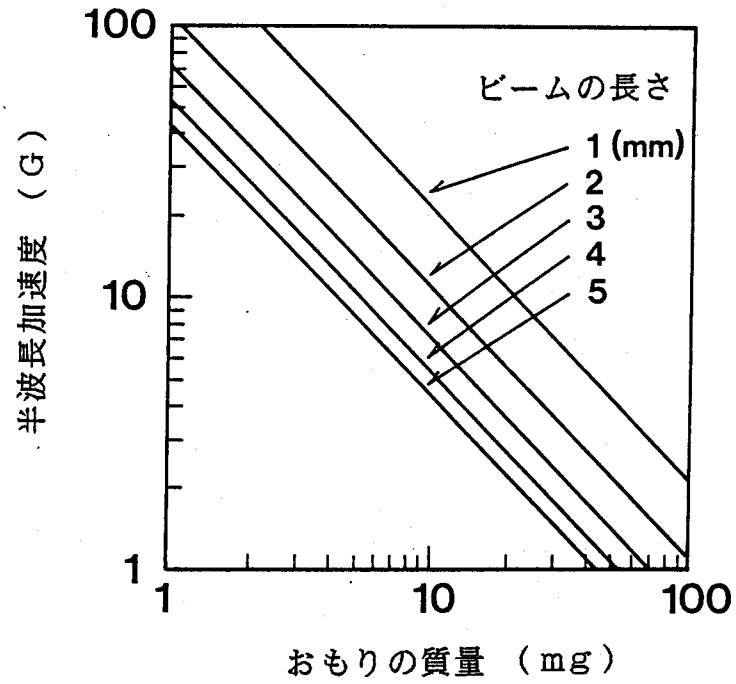


図４－６　おもりの質量と半波長加速度の関係

ら最小へ、あるいは、最小から最大へと、強弱を繰り返す干渉パターンとなる。

図４－６は、式（４－１１）を式（４－９）に代入して、おもりの質量に対する半波長加速度の変化を計算した結果である。計算では、カンチレバの幅を １０ｍｍ、厚さを １０μｍとし、カンチレバは二酸化シリコンからなるものとした。また、導波モードとして、大きな位相変化量の得られるＴＭモードを仮定した。加速度の単位は、ＳＩ単位系を用いるべきであるが、ここでは、一般に利用されている重力加速度を単位としたＧ（質量の単位と間違えないように大文字とした）を用いている。ここに示す質量のおもりは、実際に実現可能であり、図４－４の構成により加速度の計測が行えるものと期待される。

４－４－２　周波数特性

振動を取り扱う加速度計測では、センサ自体の、さらにはシステム全体の共振が問題となる。共振周波数はセンサの周波数特性を示す１要素である。図４－７は加速度センサの一般的な周波数特性であり、センサを被測定物に取り付ける方法（一例として、ねじ止めおよびマグネット吸着の場合を示している）により、その周波数特性が変化する様子を示している[29]。加速度センサとして利用する場合、測定可能な周波数範囲は、共振周波数より十分低いものに限られる。したがって、共振周波数はできるだけ高めに設定するべきである。実際には、図からも分かるように、システム全体の共振を考慮するべきであるが、ここではカンチレバの共振周波数のみについて考察する。

図４－８はおもりを装荷したカンチレバの断面を模式的に示したもので、ここでは、この共振周波数を求める方法について述べる。図中のｐＷは単位面積当りの慣性力とカンチレバの幅の積である。

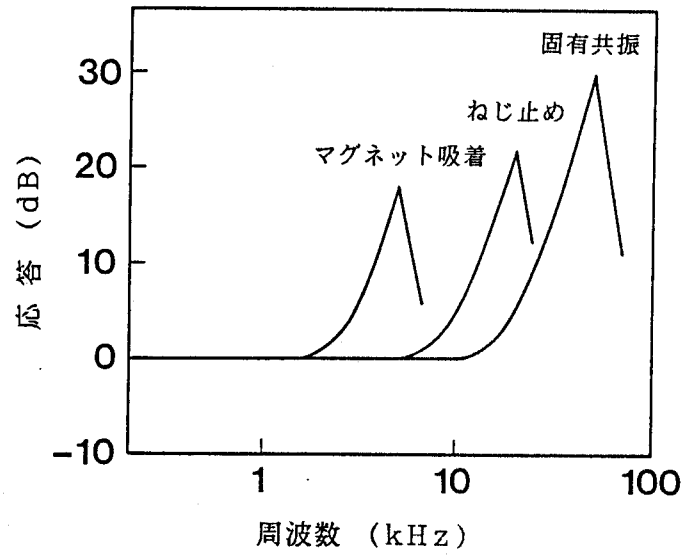


図４－７　加速度センサの周波数特性[29]

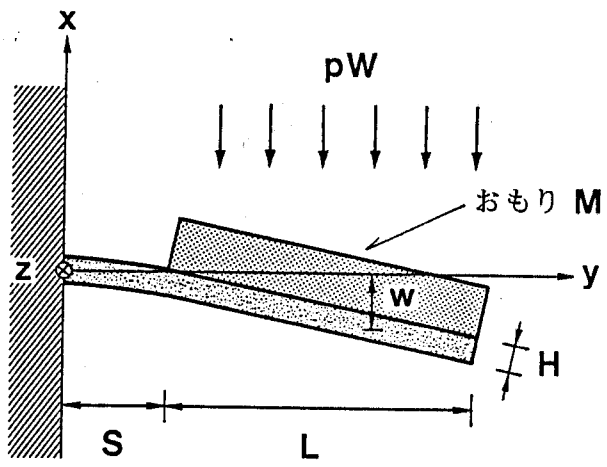


図４－８　おもりを装荷したカンチレバの断面図

カンチレバの共振周波数は、次式で表されるレーリーの式を用いて計算できる[41]。

$$f^2 = \frac{g\int_0^{S+L} w(y)\,dy}{\int_0^{S+L} \{w(y)\}^2\,dy} \qquad (4-12)$$

ここで、gは重力加速度である。また、wはたわみで、図4－8に示すカンチレバ構造では、次のように表される。

$$w(y) = \frac{pWLy^2}{2EI}\left\{\left(S+\frac{L}{2}\right) - \frac{1}{3}y\right\} \qquad (0 \leqq y \leqq S)$$

$$w(y) = \frac{pWLS^2}{2EI}\left(\frac{2}{3}S+\frac{L}{2}\right) + \frac{pWLS}{2EI}(S+L)(y-S) \qquad (S \leqq y \leqq S+L)$$

$$(4-13)$$

式（4－13）を式（4－12）に代入して、次式が得られる。

$$f = \frac{1}{4\pi}\sqrt{\frac{EWH^3}{MSL^2}} \qquad (4-14)$$

図４－９は式（４－１４）より計算したおもりの質量に対する共振周波数の変化である。ここで、カンチレバを構成する材料および寸法は、４－４－１で用いたものと同じとした。この共振周波数と図４－６に示した半波長加速度のおもりの質量に対する傾きが異なるため、同じ半波長加速度のセンサでもカンチレバの長さやおもりの質量の関係により共振周波数が

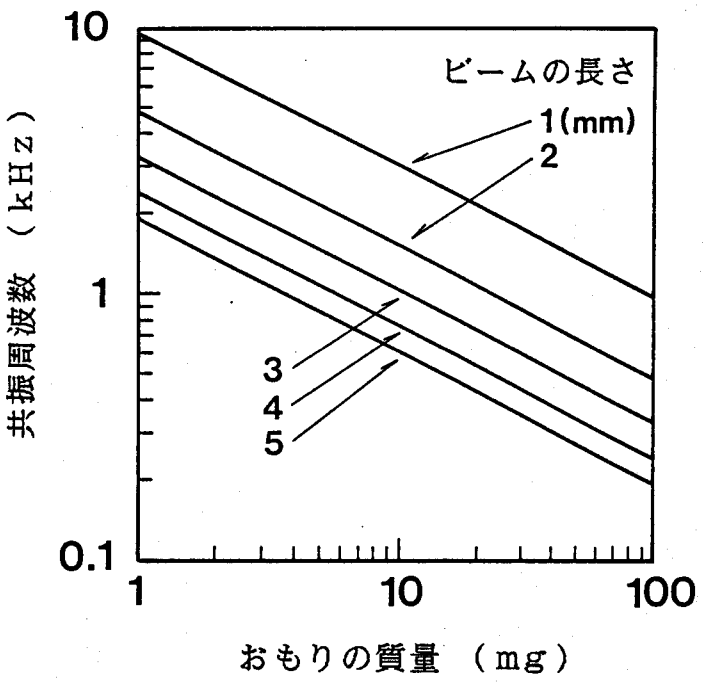


図４－９　おもりの質量と共振周波数の関係

異なってくる。例えば、半波長加速度が１０Ｇとなる　１）おもり　４．２ｍｇ、長さ　５ｍｍ、　２）おもり　１１ｍｇ、長さ　３ｍｍのカンチレバの共振周波数は、それぞれ　９４０Ｈｚ、１．２ｋＨｚである。共振周波数をなるべく高くするためには、カンチレバの長さを短くし、おもりを重くするのが有効であると言える。

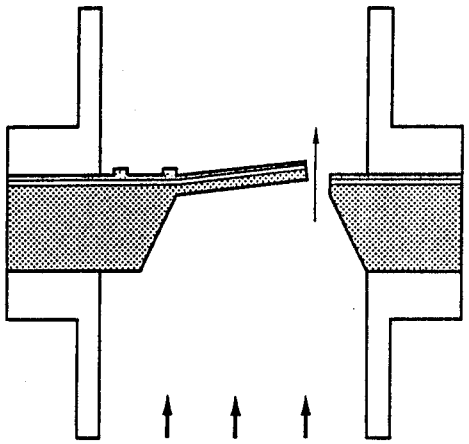
センサは、実際に測定する加速度の大きさとその周波数範囲から、必要となる半波長加速度と共振周波数を決定し、設計される。例えば、大きさが　～数Ｇで、周波数範囲が　～１００Ｈｚの加速度を計測したいとき、半波長加速度を１０Ｇ、共振周波数を１ｋＨｚ程度に設定すればよいと考えられる。これを実現するためには、例えば、カンチレバの幅を１０ｍｍ、長さを３ｍｍ、厚さを１０μｍとし、おもりの質量を１１ｍｇとすればよいと言える。

４－５　流量センサ

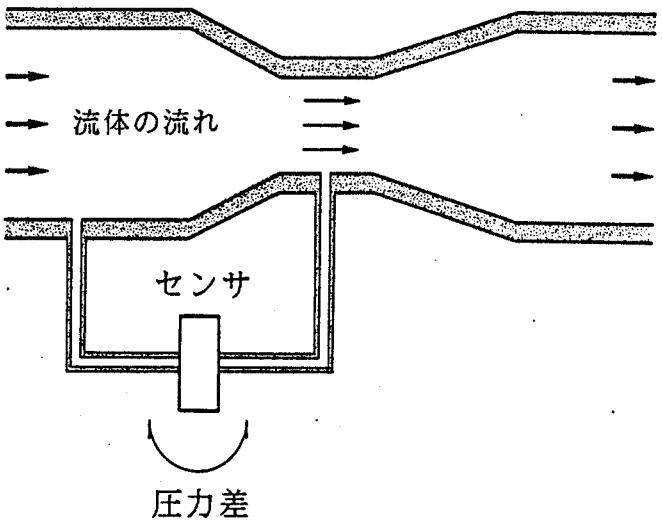
ここでは、カンチレバ構造の新しい利用法である流量センサの構成法と原理を示し、その実現性の考察、素子の試作および実験を行った結果について述べる。

４－５－１　流量計測の原理

まず、カンチレバ構造を用いて流量センサを構成する方法とその原理について述べる。図４－１０は流量計測を行うために、ここで取り扱う２種類の構成法である。両構成とも、流体の流れを一部せばめると、そこを通るときに流体の速さが増し、圧力が低下することを利用する。この圧力の低下を検出することにより、気体、液体に限らず流体の流量計測を行うこ



(a)



(b)

図４－１０　流量センサの構成

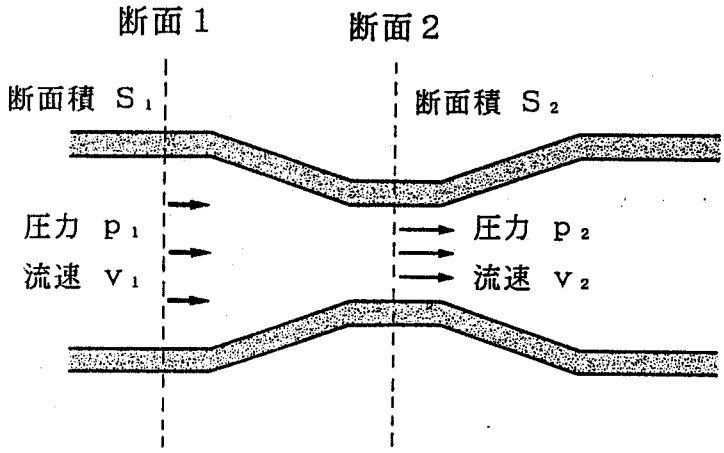


図４－１１　解析に用いた管の形状

とができる。図４－１０の構成では、カンチレバはこの圧力低下を検出するように配置されている。

圧力低下はベルヌーイの式を使って求めることができる[42]。簡単のため、図４－１１のように、断面積が流れの方向に対し変化している管を考える。流体は非圧縮性と仮定する。断面１と２の断面積をS_1、S_2とし、それぞれの断面における圧力、流速をp_1、v_1およびp_2、v_2とすると、ベルヌーイの定理から

$$p_1+\frac{1}{2}\rho v_1^2=p_2+\frac{1}{2}\rho v_2^2 \qquad (4-15)$$

の関係が成り立つ。ここで、ρは流体の密度である。また、断面１から流

入する流体の質量と断面２から流出する質量は等しいので、

$$\rho v_1 S_1 = \rho v_2 S_2 \qquad (4-16)$$

となり、式（４－１５）と式（４－１６）から、

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho\{(S_1/S_2)^2 - 1\}}} \qquad (4-17)$$

が得られる。したがって、体積流量は次のようになる。

$$Q = C v_1 S_1$$

$$= C\sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1/S_2^2 - 1/S_1^2)}} \qquad (4-18)$$

ここで、Ｃは流量係数と呼ばれ、

$$C = C_c \times C_v \qquad (4-19)$$

であって、C_c は流れの収縮に関する補正を与えるもので収縮係数、C_v は流体の粘性のための流出速度の低下に関する補正を与えるもので速度係数と呼ばれる。これらの補正係数は理論的に求めることが困難であり、実験的に両者の積である流量係数が得られる。これより、断面１、２間の圧力差が分かれば、式（４－１８）により体積流量を知ることができる。

４－５－２　流量と光出力の関係

ここでは、流体の流量に対する光の位相変化量と出力光強度変化について考察する。図４－１２は解析に用いたカンチレバの形状である。カンチレバのギャップをＧとした。式（４－１８）よりカンチレバに生じる圧力差は、

$$p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2} A \rho Q^2 \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) \qquad (4-20)$$

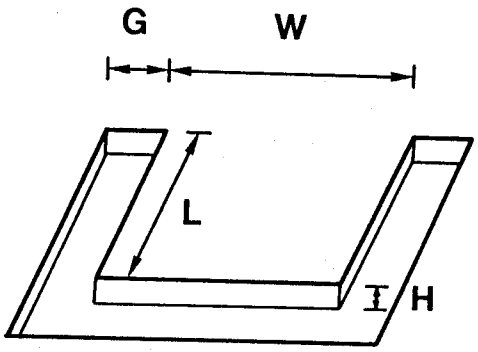


図４－１２　解析に用いたカンチレバの形状

となる。ここで、$A=1/C^2$ であり、以下の考察では、簡単のため$A=1$とする。これを式（４－９）に代入することにより、位相変化量が求められる。図４－１３はその計算結果である。計算では、カンチレバの長さを３ｍｍ、幅を５ｍｍ、厚さを１０μｍとし、ギャップＧをパラメータとした。式（４－２０）のS_1 およびS_2 は、ここでは、それぞれカンチレバ直前およびカンチレバのギャップの断面積であり、$S_1 \gg S_2 = G \times (2L+W)$とした。また、流体の出口は大気圧開放とし、被測定流体として空気を考えた。図より、位相変化量は流量の２乗に比例し、ＴＭモード光の方がＴＥモード光より位相変化量が大きいことが分かる。線の途切れた流量でカンチレバが内部に生じる応力に耐えられなくなり破壊されるものと考えられる。図より、ギャップＧによって、測定可能範囲や感度を変えることが可能であると言える。ここには示していないが、カンチレバの長さ、幅、厚さによっても、測定可能範囲や感度を変えることができる。

位相変化量は流量に比例しないため、出力光強度は流量に対して正弦波状の変化とならない。図４－１４はギャップを２０μｍとしたときの光強度変化である。ＴＭモード光の出力はカンチレバが破壊されるまでに強弱を繰り返し、ＴＥモード光の強度は、この場合０まで変化しない。ＴＭモードを利用すれば感度の高い計測が行えるが、出力に対して流量が一義的に決まらず、したがって、測定可能範囲すなわちダイナミックレンジが限られてしまう。しかし、出力光強度変化の小さいＴＥモードを併用することにより、ダイナミックレンジを広げることが可能であると言える。また、流量の少ないところでの光出力の変化が小さいが、これは干渉計を光学的にバイアスすることにより解決できるものと考える。

ところで、流体がカンチレバ部の間隙を通過後、その流れに渦が生じ、条件によっては、カンチレバの変形が不安定になるものと考えられる。特に、カルマン渦はカンチレバを共振させる可能性がある。カルマン渦とは、流体の流れの中に物体を置いたときに生じるその背後の規則正しい２列の渦のことである[43,44]。 解析により、これを評価するのは困難であり、

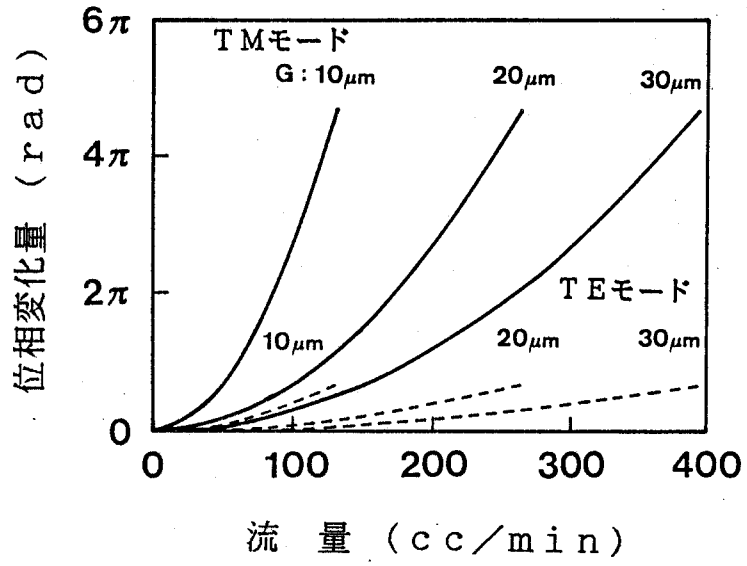


図４－１３　流量と位相変化量との関係

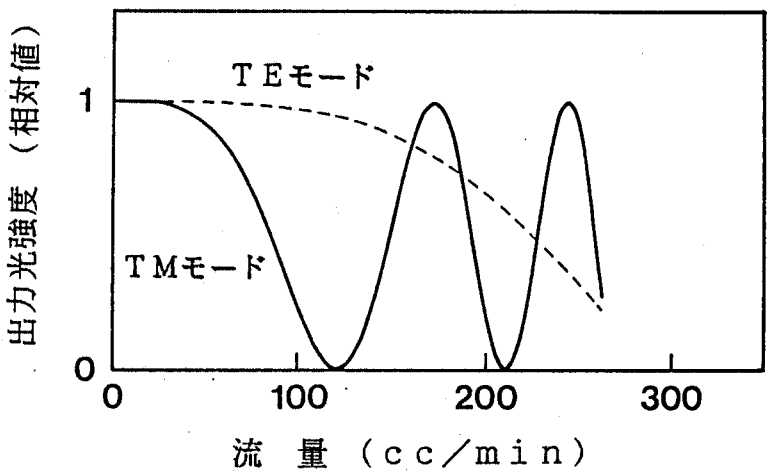


図４－１４　流量と出力光強度との関係

実験による検討が必要である。

４－５－３　設計及び試作

カンチレバ構造を利用した光導波形流量センサの基本動作を確認するため、センサの設計および試作を行った。センサは図４－１０（ａ）に示した構成とし、ここでは、窒素ガスの流量計測を試みた。波長 ０.６３μｍのＴＭモード光に対して、位相変化πを得るために必要な流量が １００ ｃｃ/ｍｉｎ となるように、図４－１３よりカンチレバのギャップを２０μｍとした。

図４－１５はセンサの作製プロセスである。また、表４－１に各プロセスの作製条件を示す。基板として、厚さ２８０μｍ、ｎ形（１００）シリコンを使用した。この基板には、前章の圧力センサの基板と異なり、p^+層およびエピタキシャル層が形成されていない。

まず、圧力センサと同様のプロセスでダイアフラムを作製した。ダイアフラムの厚みは、エッチングされた深さを測定することにより、制御した。

ダイアフラム形成後、カンチレバの作製を行った。まず、アルミニウムを２μｍ蒸着し、さらに、二酸化シリコンを０.５μｍ スパッタした。その上にフォトレジスト ＡＺ-１３５０Ｊを塗布し、流体が通過するギャップとなるコの字形のパターンをフォトリソグラフ法でレジストに転写した。それをマスクにして、まず、二酸化シリコンをエッチングするため、CHF_3ガスによる反応性イオンエッチングを行い、さらに、CCl_4ガスを用いて、アルミニウムをエッチングした。その後、コの字形のパターンが転写されたアルミニウムをマスクにして、CF_4 ガスを用いて、ダイアフラム薄膜（シリコン）をエッチングし、カンチレバ構造を形成した。カンチレバ形成後、アルミニウムと二酸化シリコンを除去した。

その後、圧力センサと同様に、二酸化シリコン（膜厚 １.８μｍ）と

７０５９ガラス（膜厚 １．３μｍ）をスパッタし、スラブ導波路を作製した。その上に、レジストを塗布した後、マッハツェンダ干渉計の導波路パターンを転写し、それをマスクにしてＣＨＦ$_3$ ガスによる反応性イオンエッチングを行い、ガラス層に０．２０μｍの段差をつけ、リブ形光導波路を作製した。

図４－１６は試作したマッハツェンダ干渉計の導波路パターンとカンチ

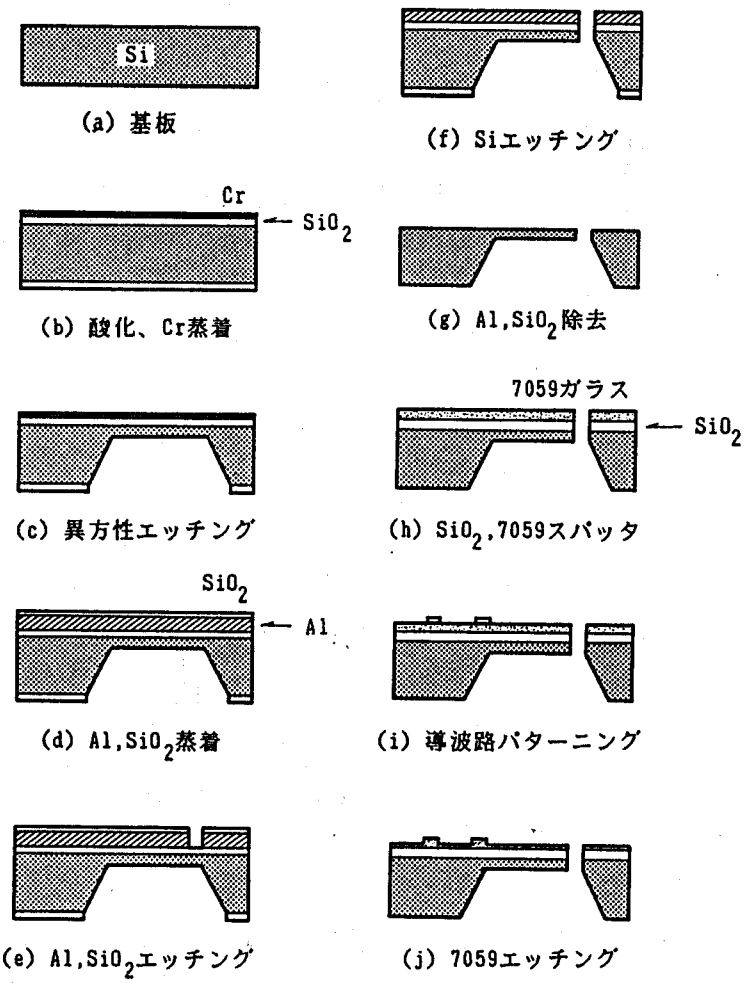


図４－１５　作製プロセス

表４－１　作製条件

基板	(１００)Ｓｉ	厚さ　２９０μｍ
異方性エッチング用 マスク材料	SiO_2(加湿酸化) Ｃｒ(電子ビーム蒸着)	温度　１１００℃、　１時間 膜厚　０.３μｍ ０.１μｍ
SiO_2エッチング	緩衝フッ酸によるウェットエッチング ４０％フッ化アンモニウム水溶液と ５０％フッ酸を７：１に混合	７分間
異方性エッチング	エチレンジアミン　６８ｍｌ ピロカテコール　１２ｇ 水　３２ｍｌ	温度　１１０℃
カンチレバ作製用 マスク材料	Ａｌ SiO_2	膜厚　２μｍ(電子ビーム蒸着) ０.５μｍ(スパッタ)
カンチレバ作製	SiO_2エッチング CHF_3ガスによる反応性イオンエッチング Ａｌエッチング CCl_4ガスによる反応性イオンエッチング Ｓｉエッチング CF_4ガスによる反応性イオンエッチング	
光導波路 (スラブ)	バッファ層(SiO_2) 導波層(7059ガラス)	膜厚　１.６μｍ(スパッタ) １.３μｍ(スパッタ)
光導波路 (リブ形)	７０５９ガラスエッチング CHF_3ガスによる反応性イオンエッチング	段差　０.２０μｍ

レバの寸法である。干渉計は導波路幅 ３．６μｍの単一モードリブ形導波路で構成され、干渉計の平行部の長さは ６．２ｍｍ、導波路間隔は ６０μｍである。また、カンチレバの長さは３ｍｍ、幅は５ｍｍで、厚さは設計より少し厚い１５μｍであった。

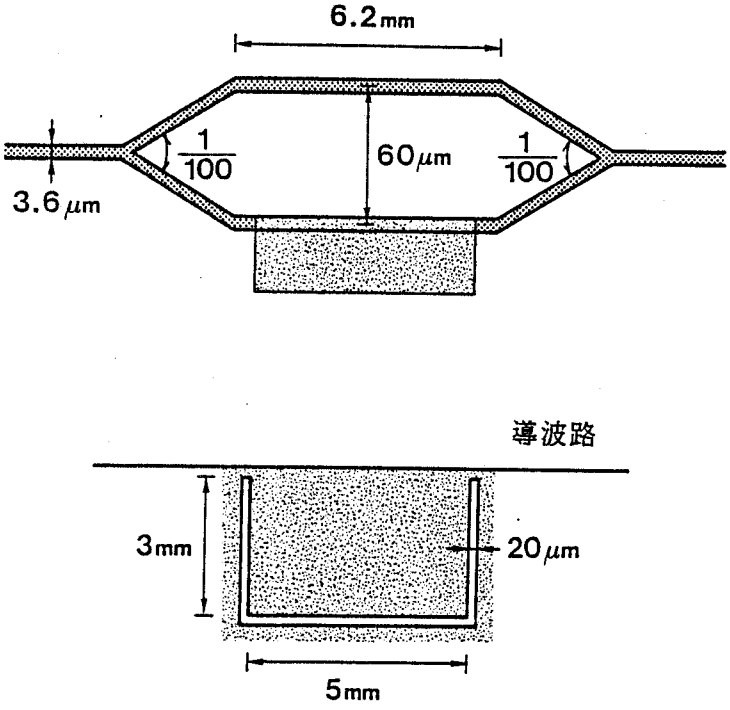


図４－１６　試作したセンサの導波路パターンと
カンチレバの寸法

４－５－４　動作実験

試作したセンサに窒素ガスを流し、出力光強度変化を測定した。図４－１７はその測定系である。光源は波長 ０.６３μｍのＨｅ－Ｎｅレーザとし、解析より高感度の期待されるＴＭモード光をセンサに端面入射した。流量を測定する流体は窒素とし、市販のフロート式の流量計を経てセンサに導入した。センサの流体出口は大気圧開放とした。

図４－１８は流量に対する出力光強度の測定結果である。流量に対し光出力が単調に減少する結果が得られた。この結果より、出力に対して流量が一義的に決まり流量計測を行うことが可能であると言える。ところで、６００ ｃｃ/ｍｉｎ以上の流量については、カンチレバに共振が生じ、測定が不可能となった。図４－１９はそのときの出力光強度変化の様子で、周波数 ６.６ｋＨｚの共振が生じていることが分かる。この共振は、カンチレバ通過後の流体の流れに、カルマン渦が発生したために起こったものと考えられる。

さて、今回の測定結果で問題となるのは、測定により得られた流量範囲が、計算により見積られたものに比べてかなり大きかったことである。計算によると、流量 １２０ ｃｃ/ｍｉｎ で光強度が最小となるものと見積られる。この差の原因の１つは、カンチレバが作製時に反ったことであり、先に述べた計算では、これについては考慮していない。試作したセンサでは、シリコンと二酸化シリコン、ガラスの熱膨張率の違いから、下向き（基板方向）にレバ端で約１７０μｍの反りが生じていた。これより、カンチレバのギャップが設計値（２０μｍ）の約５倍の１１０μｍとなっていたと見積られる。すなわち、設計時に見積った５倍の流量を流さなければ、設計した光出力変化が得られないことになる。

また、試作したカンチレバはガラス、二酸化シリコン、シリコンの３層構造であるが、計算では、二酸化シリコンの単層としたことも測定結果と計算結果が異なる原因の１つである。シリコンは二酸化シリコンに比べ硬

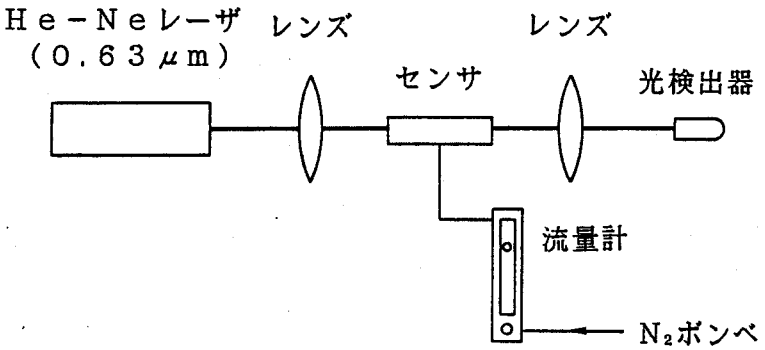


図４－１７　測定系

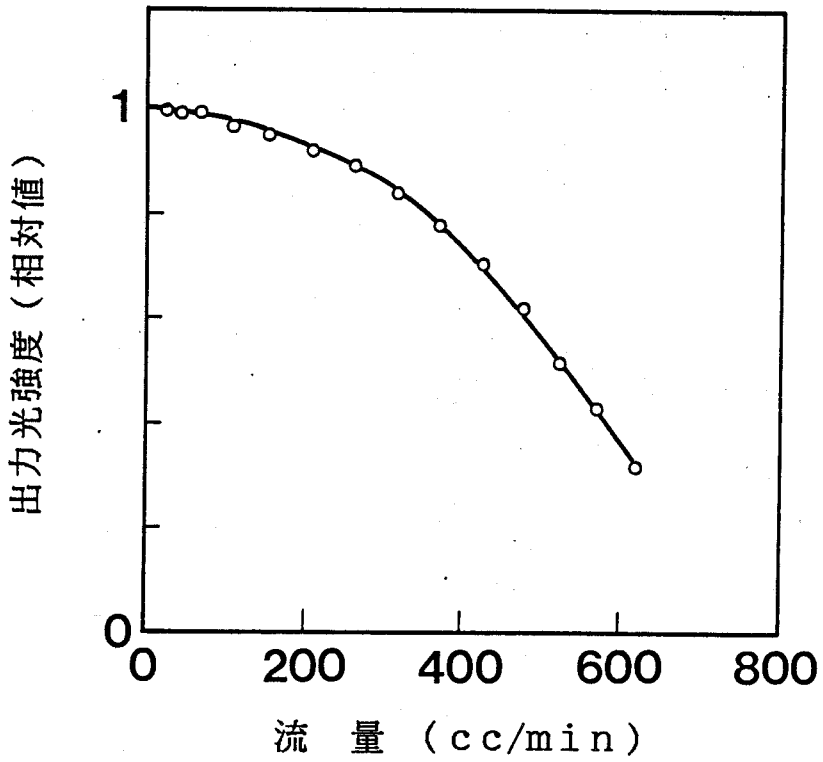


図４－１８　測定結果

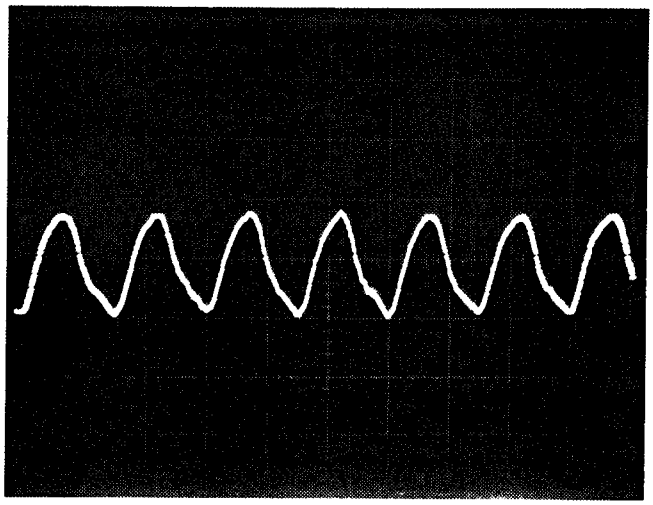


図４－１９　カンチレバ共振時の光出力

い材料であるので、試作したセンサでは、カンチレバがたわみにくくなり、したがって、流量に対する位相変化量および出力光強度変化が小さくなるものと考えられる。

さらに、計算では、流体の収縮や粘性を考慮していないが、実際の測定では、この補正が必要となる。

４－６　結言

本章では、微細構造としてカンチレバを利用した光集積回路センサについて述べた。カンチレバに、力／圧力が働くと、変形が生じる。この変形

を、光の位相変化として捉え、マッハツェンダ干渉計により、光強度に変換し検出する。このセンサは無誘導性、防爆性の特徴を有する。光集積回路構成を利用したことにより、小型、軽量となり、さらに、軸ずれなどの心配がなく信頼性の高い計測を行うことができる。

ここでは、加速度センサと流量センサの構成法と動作原理について述べた後、動作解析を行い、それらのセンサの実現性を明らかにした。解析より、導波モードとしてＴＭモードを利用するのが、大きな位相変化が得られ、有利であることが分かった。さらに、基本動作を確認するため、流量センサの設計、試作、動作実験の結果について述べ、流量に対して光強度が単調に減少する出力の得られることを示した。また、６００ｃｃ/ｍｉｎ以上の流量では、共振が起こり、流量計測が不可能となることから、０～６００ ｃｃ/ｍｉｎの流量に対して流量計測を行えることが分かった。

第5章　結論

本章では、第2章から第4章までに述べてきたシリコン基板光集積回路センサに関する研究について総括し、本論文の結論とする。

第2章では、シリコン微細構造を利用した新しい光集積回路センサの構成法について述べた。まず、素子を構成する上で重要となる微細構造の形成技術と単一モードチャネル導波路の実現法について述べた。ここでは、リブ形ガラス光導波路の単一モード条件を等価屈折率法により明らかにすると共に、実際に直線導波路を試作して、導波実験を行い、その条件を確かめた。次に、光の強度変化と位相変化を利用したセンサの構成法を示し、その動作原理について述べた。位相変化を利用したセンサ構成は多くの場合高感度となり、本研究で考察するセンサの基本構成とした。

第3章では、微細構造としてダイアフラムを利用した光集積回路センサについて述べた。ダイアフラムの表裏に圧力差を加えると、変形が生じ、この変形を光の位相変化を利用して検出するものである。位相変化を利用することにより、高感度な計測が期待される。ここでは、この位相変化を光強度変化に変換するため、導波形マッハツェンダ干渉計を利用した。まず、センサの構成と動作原理について考察した。次に、センサの解析手法を示し、さらに、動作解析を行いセンサの実現性を明らかにした。その解析をもとに圧力センサを設計、試作し、動作実験を行った結果、ダイアフラムに印加した圧力差に対して光強度が変化する干渉出力が得られ、圧力計測が可能であることを実証した。測定結果より、半波長圧力差は 0.8

$\times 10^5$ Pa、消光比は 10 dBであった。

第4章では、カンチレバ構造を利用した光集積回路センサについて述べた。カンチレバに圧力が働くと、変形が生じ、これを位相変化として捉える。第3章で述べたセンサと同様に、その位相変化をマッハツェンダ干渉計を用いて光強度変化に変換し検出する。まず、センサの基本構成とその動作原理について述べ、その構成を加速度計測および流量計測に適用する方法を示した。加速度および流量センサの動作解析を行い、それらの物理量計測が可能であることを明らかにした。さらに、カンチレバ構造を用いた光集積回路センサの基本的な動作を確認するため、流量センサの試作、実証実験を行い、その結果、流量に対して単調に減少する出力強度変化が得られ、流量計測を行えることを確認した。ただし、試作したセンサでは、600cc/min以上の流量でカンチレバが共振し、流量計測が不可能となった。

最後に、本論文で述べたセンサを実際に応用、あるいは実用化する際の今後の課題について述べる。

本研究では、圧力センサ（第3章）および流量センサ（第4章）の試作、実験を行い、それらの基本的な動作を確認した。今回試作したセンサは、ニーズが比較的多いと思われる測定可能範囲を有し、感度の点においても、一般に利用されているセンサに劣らないものと言える。圧力センサについては、試作した素子より大きなダイアフラム（3mm×5mm）を流量センサの作製過程で形成しており、このダイアフラムを利用すればより高感度が期待される。また、これらのセンサは、これまで広く利用されている電気的なセンサにはない、無誘導性、防爆性、センサヘッドへの電力の供給が不用などの特徴を有し、電磁雑音、可燃性ガスなどの存在する環境下でも信頼性の高い計測が期待される。

ところで、今回、温度特性をはじめとするセンサの使用環境などを考慮

した特性の評価は行っていないが、今後実用を考える上で、これらの検討が必要である。ここで考えたセンサでは、光集積回路構成を利用しており、温度などの外乱による影響は比較的小さいものと考えられる。

ただし、試作したセンサでは、導波層とシリコンの熱膨張率の違いから、熱応力が発生し、その応力によるセンサ特性への影響が残るものと考えられる。この影響を小さくするためには、導波路材料にシリコンと同じ熱膨張率を有するものを用いればよく、このような材料の１つに、ＳｉＯＮがある。これは二酸化シリコンと窒化シリコンの中間組成のもので、ある組成比のところで、熱膨張率がシリコンと同じとなる。第４章で述べた試作センサに生じたカンチレバの反りは、これにより解決できるものと考えられる。

ところで、今回の測定では、レーザ光を導波路端面より入出射したが、光ファイバと接着、固定することにより、導波光の入出力の結合が安定するばかりでなく、遠隔計測も可能となる。光ファイバとの結合では、結合損失をなるべく抑えることが重要であり、そのためには、導波路と光ファイバの光強度分布をできるだけ一致させるなどの導波路構造を含めた検討が必要と言える。また、光源に半導体レーザを使用することにより、コンパクトなセンシングシステムを構成できる。

さらに、センサをより一層小型化するためには、導波層材料に光弾性係数が大きい材料を用いればよいと言え、今後このような材料の開発が望まれる。

付録A　4層スラブ光導波路の界分布

図2－4に示した4層スラブ光導波路のTEモードの電界分布は、次のように表される[23]。

$$E_{y1}(x)=A\ \exp(k_{x1}x) \qquad (t<0)$$

$$E_{y2}(x)=B\ \cos(k_{x2}x-\phi_{21}) \qquad (0<t<t_2)$$

$$E_{y3}(x)=C_1\ \cosh\{k_{x3}(x-t_2)\} + C_2\ \sinh\{k_{x3}(x-t_2)\} \qquad (t_2<t<t_2+t_3)$$

$$E_{y4}(x)=D\ \exp\{-k_{x4}(x-t_2-t_3)\} \qquad (t>t_2+t_3)$$

(A－1)

TMモードについては、その磁界分布が式（A－1）のように表される。

付録B　ダイアフラムのたわみ

ここでは、第3章の動作解析を行うときにもととなるダイアフラムのたわみを導出する方法について述べる。ダイアフラムの形状は図3－4に示したものと同じとする。解析では、ダイフラムの四辺を固定端と仮定した。このとき、各辺上で、条件　$w=0$、$\partial w/\partial n=0$を満足しなければならない。ただし、$\partial/\partial n$は、各辺上での法線方向の偏微分を表す。

この条件下でのたわみは、2つの異なる境界条件のもとで、平衡方程式より求められるたわみの重ね合わせとして表すことができる。その1つは、単純支持端（条件$w=0$、$\partial^2 w/\partial n^2=0$）の場合のたわみであり、もう1つは、辺上で曲げモーメントの分布が既知である場合のたわみである。

（i）4辺単純支持端の場合

この場合のたわみは次のように表される[30]。

$$w_0=\frac{4pa^2}{\pi^5 D}\sum_{m:odd}\frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^5}\cos\frac{m\pi y}{a}$$

$$\times\left(1-\frac{\alpha_m\tanh\alpha_m+2}{2\cosh\alpha_m}\cosh\frac{m\pi z}{a}\right.$$

$$\left.+\frac{1}{2\cosh\alpha_m}\frac{m\pi z}{a}\sinh\frac{m\pi z}{a}\right)$$

（B－1）

ただし、

$$\alpha_m = \frac{m\pi b}{2a}$$

（ｉｉ）辺上で曲げモーメントの分布が既知である場合

（ｉｉ－Ａ）ｚ＝±ｂ／２上に次のような曲げモーメントが分布しているとき

$$(M_z)_{z=b/2} = \sum_{m:odd} (-1)^{(m-1)/2} E_m \cos\frac{m\pi y}{a} \qquad (B-2)$$

このときのたわみは次のように表される[30]。

$$w_1 = \frac{a^2}{2\pi^2 D} \sum_{m:odd} E_m \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^2 \cosh\alpha_m} \cos\frac{m\pi y}{a} \times \left(\frac{m\pi z}{a}\sinh\frac{m\pi z}{a} - \alpha_m \tanh\alpha_m \cosh\frac{m\pi z}{a}\right) \qquad (B-3)$$

（ｉｉ－Ｂ）ｙ＝±ａ／２上に次のような曲げモーメントが分布しているとき

$$(M_y)_{y=a/2}=\sum_{m:odd}(-1)^{(m-1)/2}F_m\cos\frac{m\pi z}{b}$$

（Ｂ－４）

このときのたわみは次のように表される[30]。

$$w_2=\frac{b^2}{2\pi^2 D}\sum_{m:odd}F_m\frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^2\cosh\beta_m}\cos\frac{m\pi z}{b}$$

$$\times\left(\frac{m\pi y}{b}\sinh\frac{m\pi y}{b}\right.$$

$$\left.-\beta_m\tanh\beta_m\cosh\frac{m\pi y}{b}\right)$$

（Ｂ－５）

ただし、

$$\beta_m=\frac{m\pi a}{2b}$$

ここで、固定端のときのたわみを、

$$w = w_0 + w_1 + w_2 \qquad (B-6)$$

のように先に述べたたわみの重ね合わせで表す。このときのたわみは、境界条件 $w=0$、$\partial w/\partial n=0$ を満足しなければならない。条件 $w=0$ は、w_0、w_1、w_2 のそれぞれについて成り立っているので、次に示す条件（$\partial w/\partial n=0$）を満たすように、E_m、F_m は決定される。

辺　$z=\pm b/2$ 上で

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

辺　$y=\pm a/2$ 上で

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

式（B－7）より

$$\frac{4qa^2}{\pi^3}\frac{1}{i^4}\left(\frac{\alpha_i}{\cosh^2\alpha_i}-\tanh\alpha_i\right)$$

$$-\frac{E_i}{i}\left(\tanh\alpha_i+\frac{\alpha_i}{\cosh^2\alpha_i}\right)$$

$$-\frac{8ia}{\pi b}\sum_{m:\mathrm{odd}}\frac{F_m}{m^3}\frac{1}{(a^2/b^2-i^2/m^2)}=0$$

（B－9）

が得られる。式（B－8）より同様の方程式が得られ、2つの方程式から、E_1、E_3、・・・、F_1、F_3、・・・が決定される。

式（B－7）と式（B－8）の条件より得られる2つの方程式は、E_i、F_mに関する無限級数を含んでいるが、実際の計算では、途中で級数を打ち切り、これらの方程式を解いた。ここでは、打ち切りによる誤差の評価を行い、級数はE、F共に第11項目のE_{21}、F_{21}までとることにした。このようにして求めたE、Fの値を式（B－3）および式（B－5）に代入して、式（B－6）から固定端とした時のたわみを求めた。

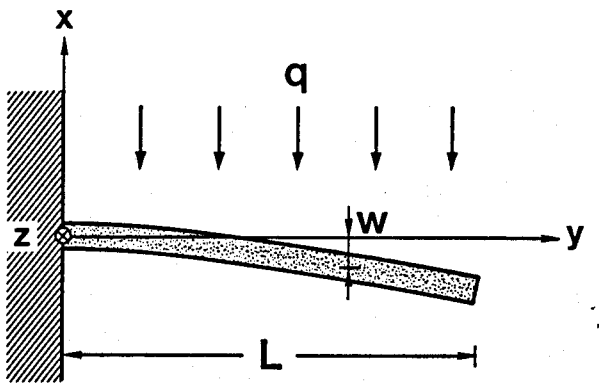
付録C　カンチレバのたわみ

ここでは、第４章の解析においてもととなるカンチレバのたわみについて述べる。図Ｃ－１はカンチレバを真横からみた図である。荷重 q（力、圧力）はカンチレバ上に一様に働くものとする。ここで、q＝p×Wである。pはカンチレバに働く圧力、Wはレバの幅である。

このときのたわみは次のように表される[39,40]。

$$w = \frac{q}{24EI}(x^4 - 4Lx^3 + 6L^2x^2) \qquad (C-1)$$

ここで、Ｉは断面二次モーメントで、次のように表される[39,40]。



図Ｃ－１　カンチレバの側面図

$$I = \frac{H^3 W}{12} \qquad (C-2)$$

ただし、Hはカンチレバの厚さである。

付録D　解析に用いた係数

ここでは、センサの実現性の考察および設計を行うときに用いた各係数の値を示す。

コンプライアンス

・二酸化シリコン[32]

$$\begin{pmatrix} \mathcal{D}_{11} & \mathcal{D}_{12} & \mathcal{D}_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \mathcal{D}_{12} & \mathcal{D}_{11} & \mathcal{D}_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \mathcal{D}_{12} & \mathcal{D}_{12} & \mathcal{D}_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathcal{D}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathcal{D}_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathcal{D}_{44} \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{D}_{11} = 1.368 \times 10^{-11} \ (\mathrm{Pa}^{-1})$$
$$\mathcal{D}_{12} = -2.326 \times 10^{-12} \ (\mathrm{Pa}^{-1})$$
$$\mathcal{D}_{44} = 3.201 \times 10^{-11} \ (\mathrm{Pa}^{-1})$$

光弾性係数

・二酸化シリコン[33]

$$\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ q_{12} & q_{11} & q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ q_{12} & q_{12} & q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{44} \end{pmatrix}$$

$q_{11} = 0.121$
$q_{12} = 0.270$
$q_{44} = 0.0745$

比誘電率

二酸化シリコン　$\varepsilon_{SiO_2} = 2.10$

７０５９ガラス　$\varepsilon_{7059} = 2.37$

謝辞

本研究を進めるにあたり、常に適切なご指導、御教示を賜りました大阪大学基礎工学部　末田正教授に深甚なる感謝の意を表します。

本研究に関して、当初から、終始一貫してご指導、御助言を頂ました井筒雅之助教授に心から感謝の意を表します。

本学在学中において、電気工学全般にわたり、有益なご指導、御教示を頂きました大阪大学基礎工学部　難波進教授、浜川圭弘教授、山本錠彦教授、小林猛教授、蒲生健次教授に深謝いたします。

また、有益なご指導と暖かい激励を頂きました小林哲朗助教授、松島朋史氏、森本朗裕氏に心から感謝いたします。

本研究を行うにあたり、快く実験装置を使用させて頂きました大阪大学付属極限物質研究センタ、ならびに山本研究室の関係諸氏に深く感謝いたします。

本論文の第３章の圧力センサの実験において、高濃度ボロンドープ層、エピタキシャル層を形成したシリコン基板を御提供頂きました住友電工の関係各位に感謝の意を表します。

さらに、本論文第２章での、シリコン基板光導波路の計算及び実験に協力して頂きました高畑浩二氏（現在、四国電力）、第４章での加速度センサの計算に協力して頂きました松本光晴氏に感謝いたします。

参考文献

[1] 大越孝敬編著：”光ファイバセンサ”，オーム社 (1986).

[2] T.G.Giallorenzi, J.A.Bucaro, A.Dandridge, G.H.Siger,Jr., J.H.Cole, S.C.Rashleigh, and R.G.Priest: J. Quantum Electron., QE-18, p.626 (1982).

[3] L.M.Johnson, G.W.Pratt, and F.J.Leonberger: in Tech. Dig. 3rd IOOC, WL4 (1981).

[4] M.Izutsu, A.Enokihara, and T.Sueta: Electron. Lett., 18, p.867 (1982).

[5] M.Izutsu, A.Enokihara, and T.Sueta: IEEE/OSA J. Lightwave Technol., LT-4, p.833 (1986).

[6] A.Enokihara, M.Izutsu, and T.Sueta: Appl.Opt., 27, p.109 (1988)

[7] A.Enokihara, M.Izutsu, and T.Sueta: IEEE/OSA J. Lightwave Technol., LT-5, p.1584 (1987).

[8] K.E.Petersen: Proc. IEEE, 70, p.420 (1982).

[9] M.Esashi, H.Komatsu, T.Matsuo, M.Takahashi, T.Takishima, K.Imabayashi, and H.Ozawa: IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, p.57 (1982).

[10] 庄子習一，江刺正喜：電子情報通信学会論文誌，J71-C, p.1705 (1988).

[11] J.T.Boyd, and C.L.Chen: IEEE J. Quantum Electron., QE-13, p.282 (1977).

[12] J.T.Boyd, C.M.Chung, and C.L.Chen: Appl. Opt., 18, p.506 (1979).

[13] S.Ura, T.Suhara, H.Nishihara, and J.Koyama: IEEE J. Lightwave Technol., LT-4, p.913 (1986).

[14] H.Z.Chen, A.Ghaffari, H.Wang, H.Morkoc, and D.V.Lang: Appl. Phys. Lett., 49, p.155 (1986).

[15] D.L.Kendall: Appl. Phys. Lett., 26, p.195 (1975).

[16] E.Bassous: IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, p.1178 (1978).

[17] E.Bassous, and E.F.Baran: Solid-State Science and Technology, 125, p.1321 (1978).

[18] A. Bohg: J.Electrochem. Soc., 118, p.401 (1971).

[19] N.Takato, M.Yasu, and M.Kawachi: Electron. Lett., 22, p.321 (1986).

[20] Y.Kokubun, T.Baba, T.Sakaki, and K.Iga: Electron. Lett., 22, p.892 (1986).

[21] R.A.Soref, and J.P.Lorenzo: IEEE J. Quantum Electron., QE-22, p.873 (1986).

[22] 大河正志，高畑浩二，井筒雅之，末田　正：輻射科学研究会資料，RS85-10 (1985).

[23] W.Stutius, and W.Streifer: Appl.Opt., 16, p.3218 (1977).

[24] 小山次郎，西原　浩：”光波電子工学”，コロナ社 (1983).

[25] 西原　浩，春名正光，栖原敏明：”光集積回路”，オーム社 (1985).

[26] S.Sriram, W.D.Partlow, and C.S.Liu: Appl.Opt., 22, p.3664 (1983).

[27] M.Izutsu, A.Enokihara, and T.Sueta: Opt.Lett., 7, p.136 (1982).

[28] 大河正志，高畑浩二，井筒雅之，末田　正：昭和６２年信学総全大，994.

[29] 片岡照栄，柴田幸男，高橋　清，山崎弘郎：”センサハンドブック” 培風館 (1986).

[30] S.Timoshenko, and S.Woinowsky-Krieger: "Theory of Plates and Shells", McGraw-Hill (1981).

[31] 栖原二郎：”平板の曲げ理論”，培風館 (1972).

[32] B.A.Auld: "Acoustic Fields and Waves in Solids", John Wiley & Sons (1973).

[33] 末田　正：”光エレクトロニクス”，昭晃堂 (1985).

[34] M.Izutsu, and T.Sueta: Appl.Phys., 5, p.307 (1975).

[35] 東京天文台編纂：”理科年表”，丸善 (1988).

[36] M.Kojima, M.Sunagawa, H.Seto, Y.Matsui, M.Okuyama, and Y.Hamakawa: Proceedings of the 2nd Sensor Symposium, p.241 (1982).

[37] L.M.Roylance, and J.B.Angell: IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, p.1911 (1979).

[38] K.E.Petersen: IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, p.1241 (1978).

[39] 柴原正雄：”材料力学”，理工学社 (1977).

[40] 清家政一郎：”材料力学”，共立出版 (1979).

[41] J.P.Den Hartog: "Mechanical Vibrations", McGraw-Hill (1956).

[42] 安藤常世：”流体の力学”，培風館 (1979).

[43] 今井　功：”流体力学　前編”，裳華房 (1975).

[44] 富田幸雄：”流体力学序説”，養賢堂 (1977).

本研究に関する発表論文

Ⅰ．論文等

1．論文

(1) M.Ohkawa, M.Izutsu, and T.Sueta:
"Integrated Optic Accelerometer Employing a Cantilever on a Silicon Substrate", Jpn. J. Appl. Phys., 28 (1989) to be published.

(2) M.Ohkawa, M.Izutsu, and T.Sueta:
"Integrated-Optic Pressure Sensor on Silicon Substrate", submitted to Appl.Opt.

(3) M.Ohkawa, M.Izutsu, and T.Sueta:
"Integrated-Optic Flow Meter using a Cantilever on Silicon Substrate,"
（投稿予定）.

２．会議

(1) M.Ohkawa, M.Izutsu, and T.Sueta:
"Integrated-Optic Pressure Sensor and Accelerometer on Silicon Substrate",
Second Optoelectronics Conference (Tokyo,1988), 4A1-3.

II．口頭発表

１．研究会

（１）大河正志，高畑浩二，井筒雅之，末田　正：
「シリコン基板光導波路の単一モード化」
輻射科学研究会資料　RS85-10 (1985.12).

（２）末田　正，井筒雅之，大河正志：
「シリコン基板光導波路を用いた圧力センサ」
特定研究『光波利用センシング』
第７回研究会講演資料集　p.33-p.36 (1987.10).

（３）大河正志，井筒雅之，末田　正：
「シリコンダイアフラム構造を用いた光導波形圧力センサ」
光・量子エレクトロニクス研究会
信学技報　OQE87-122 (1987.11).

（4）末田　正，井筒雅之，大河正志：
「カンチレバ構造を利用した光導波形センサ」
特定研究『光波利用センシング』
第１１回研究会講演資料集　p.31-p.34 (1988.10).

２．学会発表

（1）大河正志，井筒雅之，末田　正：
「Ｓｉ基板チャンネル光導波路の単一モード化」
電子通信学会総合全国大会(神奈川大学)　992 (1985.3).

（2）大河正志，井筒雅之，末田　正：
「光導波形圧力センサの一構成法」
電子通信学会総合全国大会(新潟大学)　1015 (1986.3).

（3）大河正志，井筒雅之，末田　正：
「ダイアフラム構造を用いた光導波形センサ」
レーザー学会学術講演会第７回年次大会　30aⅢ9 (1987.1).

（4）大河正志，高畑浩二，井筒雅之，末田　正：
「カンチレバ構造を用いた光導波形センサ」
電子情報通信学会総合全国大会(慶応義塾大学)　994 (1987.3).

（5）大河正志，井筒雅之，末田　正：
「シリコン基板導波形圧力センサ」
電子情報通信学会半導体・材料部門全国大会(熊本大学)　497
(1987.11).

（6）大河正志，山崎秀人，井筒雅之，末田　正：
「シリコン基板光導波形ガス混合比センサの一構成法」
電子情報通信学会春季全国大会(早稲田大学)　C-602 (1988.3).

（7）大河正志，井筒雅之，末田　正：
「カンチレバ構造を用いた光導波形流量センサ」
第４９回応用物理学会学術講演会(富山大学)　6p-ZD-11
(1988.10).