



センシング技術への光ファイバの応用

保立 和夫

東京大学工学部境界領域研究施設 〒153 目黒区駒場 4-6-1

(1983年6月23日受理)

Optical-Fiber Applied Sensing

Kazuo HOTATE

Institute of Interdisciplinary Research, Faculty of Engineering, University of Tokyo,
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153

1. はじめに

光ファイバは低損失、広帯域であるという光通信にとって重要な特性¹⁾のほかに、その材料がガラスであることに起因して、可撓性、細径、軽量、無誘導、絶縁性、耐水性、耐火性といった特徴を有する。その特性例は表1に示すとおりであるが²⁾、これら特徴は光ファイバをたんに通信用伝送路にとどめず、センシング技術分野へも新しい手段を提供している³⁻⁷⁾。たとえば、被測定物理量の変化により光の透過率が変わるセンサを用い、測定・表示装置との間を光ファイバで接続すれば遠隔計測システムが構成される。これは、従来の計測方式の単純な延長線上に位置するものであるが、光ファイバのもつ上記特性により、狭空間計測、微細計測、電磁雑音下計測、高電圧下計測、生体計測といった従来の電子計測では適用が不可能あるいは困難であった特殊環境下での新しい計測手段を与える。また、光ファイバ中を伝播する光波の位相、損失等が外的要因により変化する現象を利用して光ファイバ自体をセンサとする積極的な応用形態も考案され、きわめて高感度な新しいセンサ構成法が提供されている。

本稿では、このようにして新たに形成されつつある“光ファイバ応用センシング技術”分野の研究・開発動向について事例を紹介しながら解説を試みる。

2. 光ファイバを用いたセンシング方式の分類

これまでに研究・開発された光ファイバ応用センシ

ング技術を光ファイバの利用形態に着目し、表2に分類した。このようにすでに多くの研究例が見られるが、これらは前述のように大きく二つに分類される。その第1は、光ファイバはたんに光波の伝送路として用いられセンサは別に設けるものである。その構成は図1に示したようにさらに透過形、反射形、アンテナ形に分類することができるが、いずれもセンシングの主体は物理量を光波の振幅、位相、周波数、偏波等の変化に変換するセンサ部である。ここでは、光ファイバを導入することにより容易にプローブ化が可能となり、しかも、表1に示した絶縁性等の特性により特殊環境下での遠隔計測に新しい手法が提供されるところに技術的価値がある。

これに対し、もう一方の利用形態は光ファイバ自体をセンサとするもので、外的要因による光ファイバ中の伝播光の位相、偏波、周波数、振幅変化などが利用され、より積極的な応用形態といえる(図1(d))。ここでは、光ファイバの可撓性と低損失性を利用して、長尺・小半径の光ファイバループを形成し外的要因との相互作用長を長くして高感度化が図られることに大きな利点がある。とくに、光ファイバ中の伝播光の位相変化は外的要因に対して高感度に応答するので、光ファイバを光路とする干渉計を用いる手法が多く研究され、光学系を動的に安定化するなどして 10^{-6} rad という極微小な位相変化に対応した微小物理量の検出が可能となっている。この場合、安定な干渉を得るために、電磁界分布が単純でしかも近似的に直線偏波である HE_{11} モードのみを伝播する単一モード光ファイバ¹⁾が使われ、これに対し、伝送路としての利用では光の励振、接続等の扱いが容易な

表 1 光ファイバの特徴²⁾

特徴	特性 (例)
低損失	3~10 dB/km (最低 0.2 dB/km)
広帯域	30 MHz・km~10 GHz・km
可撓性	半径 20 mm ± 90° の繰返し曲げに 5 万回以上耐える
細径	直径約 150 μm, コーティング付心線は約 1 mm
軽量	数百 g/km (心線)
無誘導	19 KAT/m, 1,550 kV/m のインパルス性磁界, 電界の影響なし
絶縁性	沿面放電電圧は長さ 20 cm で 80 kV, 80 cm で 300 kV (プラスチッククラッド)
耐水性	とくに石英系は大
耐火性	石英系光ファイバの融点は 1,700°C 以上

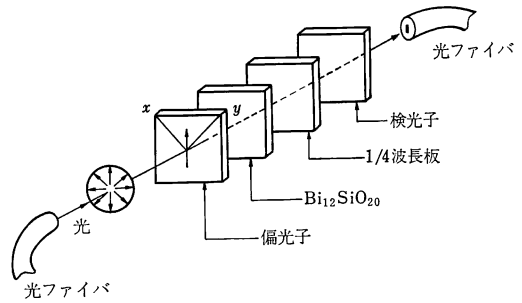


図 2 一次電気光学効果を用いた光ファイバ電界・電圧計のセンサ部構成¹²⁾

導体光源を中心とした光通信技術の進展に伴って実用化されたデバイスが用いられ、それらデバイスの特性を積極的に利用した新しい計測方式の開発も見られる。以下に各センサ構成について具体例を紹介しよう。

3. 伝送路としての利用方式

この方式の技術課題は、センサ部分をいかに構成するかということ、適当なセンサの導入により特殊環境下での計測システムが得られる。表 2 に示したように多くの研究例が見られるが、ここではそのうちから電圧・電界計と小型マイクロフォンを紹介しよう。

電力分野では、高電圧・高電界を無侵襲でしかも安全に計測したいという要求が高く、早くから光を用いた計測技術の研究が進められてきた¹¹⁾。一次電気光学効果を有する光学結晶の屈折率は加わる電界に比例して変化する。したがって、結晶伝播光の位相、あるいは複屈折性のために偏波状態の変化が生じる。これを、たとえば図 2 のような構成で検光子を透過する光強度に変換することにより電圧・電界センサが構成される¹²⁾。温度安定性が比較的優れたビスマスシリコンオキシド (BSO)¹²⁾ やビスマスゲルマニウムオキシド (BGO)^{13,14)} を用い、光源として LED, 光波の伝送路として多モード光ファイバを用いたプローブ型のセンサが構成されている。センサ部が約 20×10×10 mm と小型化され、プラスチックコネクタで光ファイバと脱着できるものが作られている¹²⁾。これは、表 2 中の透過形の一例であり、光ファイバの絶縁性、無誘導性、可撓性が利用されて高インピーダンスの電圧・電界センサを提供する。

表 2 中の風向・風速計は鉄塔上にとり付けた際の雷害対策として全光化を施したものである¹⁵⁾。温度計は防塵対策の必要な計測対象にとって重要である¹⁶⁻¹⁹⁾。

反射型構成の一例として光ファイバをプローブとしたマイクロフォンを紹介しよう。これは、光ファイバの先

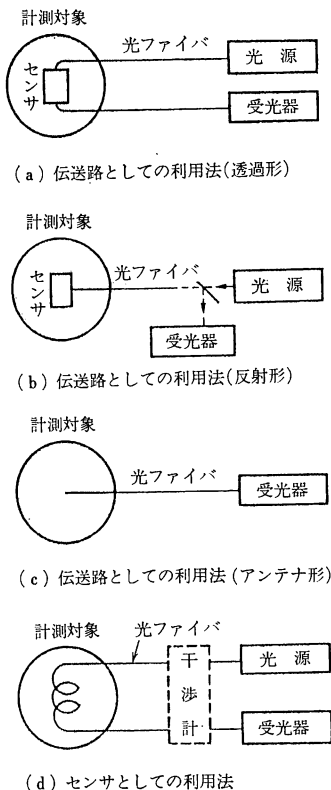


図 1 光ファイバを用いたセンシング方式の分類²⁾

多モード光ファイバ¹⁾が多く用いられる。

光ファイバ干渉計センサとして最も注目されているものはリング干渉計による光ファイバジャイロ⁸⁻¹⁰⁾であり、航空機や船舶の慣性航法用レートジャイロが実現できるものと期待され、すでにその仕様に匹敵する 0.02 deg/h という微小回転の検出能力が達成されている。

これら光ファイバ応用センシング技術においては、半

表2 光ファイバを用いたセンシング方式の分類と研究・開発例

分類	構成法	被測定量	効果	検出量	特性(例)など	光ファイバ	文献	
伝送路としての利用	透過形	電圧・電界	ポッケルス効果	偏波成分	1~1,000 V, 0.1~1,000 V/cm	多モード	12-14)	
		風向	コード板	光のオン・オフ	16方位	"	15)	
		風速	断路	光の断続周波数	60 m/s	"	15)	
		温度	バイメタルの湾曲	透過光量	オン・オフ	10~50°C (精度0.5°C)	"	16)
			半導体の吸収端			-10~300°C (精度 ±1°C)		17)
			フェライトの磁性変化			18, 19)		
			パラフィンの相変化					
		水銀柱の上昇						
	振動	フィルタの振動	"	0.05~500 μm	"	20)		
	水中音響	全反射条件	"	最小感度 1~10 mPa	"	21)		
	加速度	光弾性効果	"	~1 mg	"	22)		
	反射形	空中音響	多重干渉	反射光	1/2 コンデンサマイクの感度に匹敵	"	23)	
		血液中のO ₂	分光特性	"	カテーテル化	バンドル	24)	
		マイクロ波強度	液晶の反射率変化	"	場を乱さない	"	25)	
アンテナ形	高電圧インパルス波形	発光ダイオードの発光	伝送光量	立上り 10 ns	多モード	26)		
	光電界分布	結合効率	伝送光量, 位相	高分解能計測	単一モード	27)		
	温度	赤外線放射	伝送光量	250~1,200°C (精度 1%)	多モード	28)		
光ファイバセンサとしての利用	リング干渉計	回転	サグナック効果	干渉光強度(位相)	0.02°/h	単一モード	29-77)	
		電流	ファラデー効果	"	円偏波維持ファイバ利用	"	78)	
	マッハツェンダー干渉計	水中音響	音響光学効果	"	1~100 rad/atm·m	"	79-83)	
		温度	熱による伸縮		>100 rad/°C·m		83)	
		電流・磁界	磁歪効果		最小感度~10 ⁻⁹ Oe/m		84-86)	
		電流	ジュール熱		~10 μA		87)	
	ファブリーペロ干渉計	水中音響	音響光学効果	多重干渉光強度(位相)	マッハツェンダー形より高感度化可能	"	98-100)	
		温度	熱による伸縮					
	マイケルソン干渉計	光源スペクトル	波長フィルタ作用	透過光量	高分解能		101)	
		振動・流速	ドップラー効果	ビート周波数	流速 10 ⁻⁴ ~10 ³ m/s	多モード 単一モード	107-109)	
	直交偏波間の干渉	水中音響	音響光学効果	干渉光強度(位相)	温度変動の影響を除去する構成が可	偏波維持 単一モード	110, 111)	
		磁界	磁歪効果					
	干渉計以外の構成	水中音響	マイクロバンド損失	透過光量	最小感度~100 mPa	多モード	112)	
		電流・磁界	ファラデー効果	偏波方向	直交偏波モードに考慮が必要	単一モード	113-117)	
流量		流れによるファイバの振動	モード間干渉変化	>0.3 m/s	"	118)		
放射線量		着色中心の生成	透過光量	0.01~1 M rad	"	119, 120)		

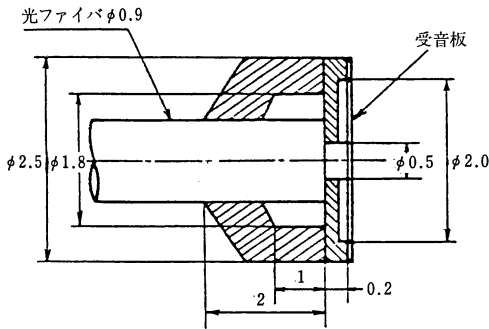


図3 光ファイバブロープマイクロフォンのセンサ部構成²³⁾

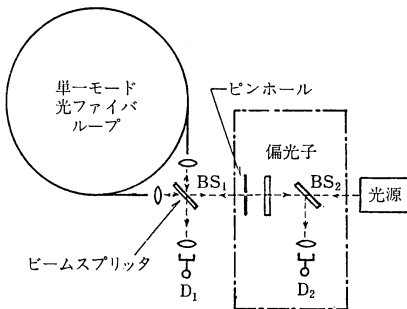


図4 光ファイバジャイロの基本光学系⁹⁾

端部に図3のようなハーフミラーから成る受音板を設け、ファイバ端面と受音板とが構成するファブリーペロー干渉計の反射率が受音板の振動により高感度に変化する現象を利用したものである²³⁾。きわめて小型のマイクロフォンが構成され、狭空間での音響計測を可能にする。人の口腔内の音場計測への応用例が見られる。

4. 光ファイバジャイロ

単一モード光ファイバをループ状光路にもつリング干渉計²⁹⁾は慣性空間に対する回転計として作用し、将来の純光学的・高感度なレートジャイロとして注目されている⁸⁻¹⁰⁾。これは、光ファイバ応用センシング技術のなかで最も活発な研究が進められている分野である。以下に、その原理、現状等を述べる。

4.1 Sagnac 効果

図4に光ファイバジャイロの基本構成を示す⁹⁾。破線で囲まれた部分の機能は後述することとし、まず受光器D₁の出力に着目する。光源を發した光波をビームスプリッタBS₁で2分し、単一モード光ファイバループ中を右回りおよび左回りに伝播させ出射光どうしの干渉を得る。このとき、両回り光間には光学系全体の慣性空間

に対する回転角速度 Ω に比例して、位相差

$$\Delta\theta = \frac{4kAN}{c} \Omega = \frac{4\pi La}{c\lambda} \Omega \quad (1)$$

が生じる⁸⁻¹⁰⁾。ここで、 k は真空中の波数、 A はループの面積、 N はターン数、 L はファイバ長、 a はループ半径、 c および λ は真空中の光速および波長である。本効果はSagnac効果と呼ばれる³⁰⁾。本効果の発見は1913年のことであるが、その感度は小さく、Michelsonらが1ターンの光ループで地球自転を計測した際には、 $A=644 \times 322 \text{ m}^2$ という大きなループが必要であった。これに対し、低損失の単一モード光ファイバを利用して長尺ファイバを多数ターンのループにして用いれば、比較的小型で十分な感度が達成される。式(1)に光ファイバの屈折率が影響しない点は特記すべきことである^{30,31)}。

光を用いたジャイロとしては、すでにリングレーザジャイロが実用化されている³²⁾。しかし、これはリング状光路で左右逆回りに発振する二つのレーザ光間の発振周波数差を測定するもので、低回転速度領域では引込み現象のため両者の周波数が同一となり測定に困難が生じる³³⁾。光ファイバジャイロにはこの問題がない。

図4の基本光学系で得られる干渉光出力は $\cos \Delta\theta$ に従って変化するため、このままでは低角速度領域で感度が得られない。そこで、4.2節で示すような手法が考案されている^{8,9)}。感度の最適化が図られた場合の理論的角速度検出限界は受光器のショットノイズで与えられ、損失数 dB/km の光ファイバによって $\sim 10^{-8} \text{ rad/s}$ の微小回転角速度が検出可能となることが示されている^{34,35)}。これは慣性航法用レートジャイロとして十分な性能であり、すでに後述するように、実験系により $1 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$ という分解能が達成されている。

4.2 感度の最適化手法と雑音要因

光ファイバジャイロの感度の最適化手法としては、左右両回り光間に直接 $\pi/2$ の位相差バイアスを与えて $\sin \Delta\theta$ に比例した出力を得る方式³⁶⁻⁴⁵⁾、光ファイバ中の光波に位相変調を与える方式^{46,47)}、光源の周波数を変化させる方式^{48,49)}、さらには光ヘテロダイン技術を用いる方式^{40,50-56)}等が考案されている。ここでは、そのおもなものを紹介し、あわせて性能向上に必要な事項にもふれよう。

4.2.1 位相変調法

これまでに最も高性能化が図られた方式は位相変調法である。図5にその基本構成を示す⁵⁷⁾。光ファイバループの一端近くに伝播光位相の変調器を設け、これを周波数 f_0 ($\sim 100 \text{ kHz}$) で駆動する。このとき右回り光と左

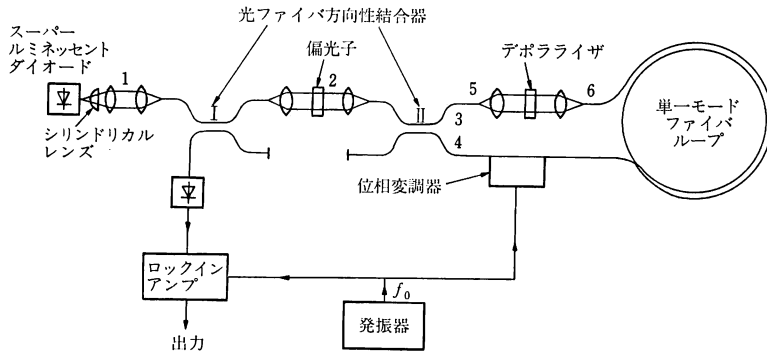


図5 位相変調方式光ファイバジャイロの光学系構成例⁵⁷⁾

回り光とはそれぞれ異なるタイミングで位相変調を受けることになり、受光器出力には f_0 成分が現われ、その振幅は $\Delta\theta$ の \sin 関数として与えられて感度が最適化される⁴⁶⁾。

光ファイバジャイロで上記理論限界を達成するには、 $\sim 10^{-6}$ rad という微小な位相差の測定が必要となり、光学系に対し厳密な雑音・ドリフト対策が求められる。その結果、左右両回り光は完全に同一光路を（逆回りに）通すべきこと、両光は同一偏波・同一モードであることが要求される⁷⁾。そこで、光ファイバとしては単一モード光ファイバ¹⁾を用いることになり、また、図4の破線で囲った光学系を導入して受光器 D_2 を用いるのが理想とされる。これは、左右両回り光に対するビームスプリッタの寄与を同一にし、かつ両光が完全に空間的に同一の場所を伝播するようにしたものである。図5の位相変調法の光学系はこの条件を満たすものである。

光ファイバジャイロの短期分解能を与える現実的な雑音要因は光ファイバ中での後方レーリー散乱となり、これが信号光の位相を乱して地球自転速度 (7.3×10^{-5} rad/s) 以上の雑音を生じる^{58,59)}。その有効な解決法は、光源のコヒーレンスを低減して散乱光が信号光と干渉しないようにすることである。このため、スペクトル幅の広いスーパーluminescentダイオード（干渉距離 $20 \mu\text{m}$ ⁵⁷⁾ やマルチモード LD が有用である。また、ドリフト要因としては、第一に光ファイバ中での偏波状態変動があげられる。これは、通常の単一モード光ファイバ中には偏波の直交する二つのモードが伝播可能で、しかも外乱によりそれら両者間にエネルギーのやりとり（モード変換）が生じるためである¹⁾。この解決のためには図4および図5に示したように偏光子を用いて入射偏波と同一方向の出射偏波成分のみを取り出すことが要求される^{60,61)}。このようにして左右両回り光間の相対位相変動

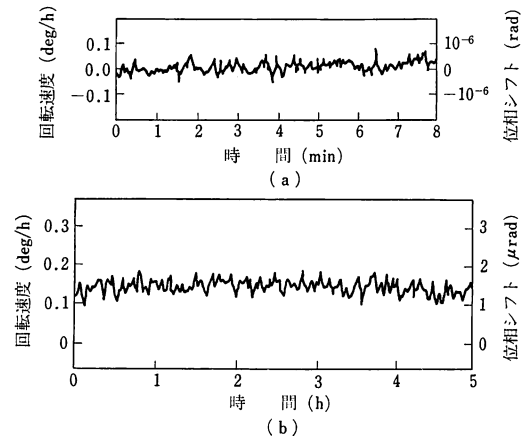


図6 位相変調方式光ファイバジャイロの実験系により得られた特性例
ここでは単一モード光ファイバを用いた機能部品により全光学系が構成されている^{58,69)}。
(a) 短期分解能 (積分時間1秒)⁶⁹⁾
(b) 零点ドリフト (積分時間30秒)⁶⁸⁾

は相殺されるが、受光器に達するパワーの変動は残存し、スケールファクタ変動となる。この解決法としてはデポライザの導入⁵⁷⁾、最近開発が活発化している偏波面保存光ファイバ⁶²⁾の導入が考えられる。このほか光ファイバの長手方向の不均一な温度変動⁶³⁾や地磁気により生じるファイバ中でのファラデー効果^{64,65)}、ファイバ中での Kerr 効果もドリフト要因となる^{66,67)}。これらの典型値は地球自転相当である。地磁気への対策としては磁気シールドのみが試みられている⁶⁴⁾。Kerr 効果の低減には、コヒーレンスの低い光源の導入が有効である⁶⁸⁾。

図6に上記雑音要因に対策を施して得られた位相変調方式ファイバジャイロの特性例を示す。図6(a)は短期分解能⁶⁹⁾ (積分時間1秒)を、図6(b)は零点の安定性⁶⁸⁾ (積分時間30秒)を示しており、いずれも慣性航

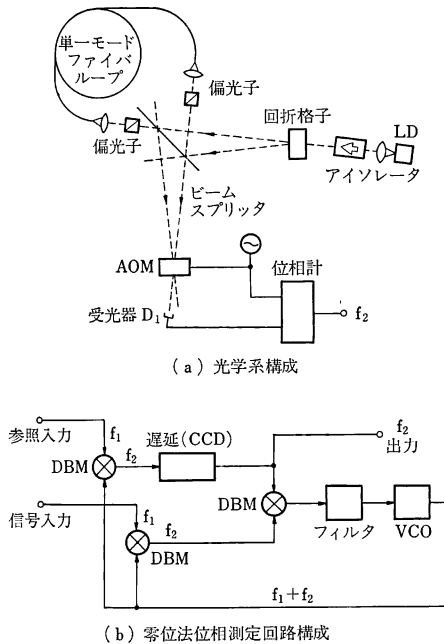


図 7 光ヘテロダイン方式ファイバジャイロ⁵⁰⁻⁵²⁾

法用に利用しうる 0.02deg/h (rms 値) を達成している。

4.2.2 光ヘテロダイン法

上記のように位相変調法は高い分解能および零点の安定性を達成しているが、本質的に受光器出力中の変調周波数成分の大きさが出力であるため、光源のパワー変動や単一モード光ファイバ中での偏波状態変動によって生じるスケールファクタ変動が残存する。これは、その安定性として 10ppm 程度以上が要求される慣性航法用には問題となる。その解決法としては 2 次高調波での位相変調を加えることによる手法が提案されているが⁷⁰⁾、本質的な解決法は零位法の導入である。零位法が導入可能な方法として周波数変化法^{48, 49, 71)}と呼ばれる方法と光ヘテロダイン法^{40, 50-52)}とがある。周波数変化法とは、リング状光路の一端に音響光学変調器 (AOM) を挿入し、左右逆回り光が異なる周波数で光ファイバを伝播するようにして、その結果生じる位相差で Sagnac 効果を相殺するものである。光ヘテロダイン法に関しては、筆者らの開発した方式を以下に紹介させていただく。

図 7 (a) に光ヘテロダイン方式ファイバジャイロの光学系を示す⁵⁰⁻⁵²⁾。光源を發した光はグレーティング、ビームスプリッタにより 2 分され、それぞれファイバ中を右回りあるいは左回りに伝播後 AOM に導かれる。ここで、AOM は周波数シフトとしてだけでなく方向性

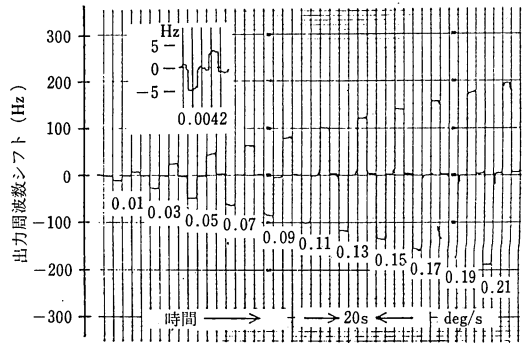


図 8 光ヘテロダイン方式ファイバジャイロによる回転検出例⁵⁰⁻⁵²⁾
0.0042 deg/s は地球の自転速度

結合器としても動作し、APD は光ヘテロダインの原理により AOM 駆動周波数と同一の交流電気信号を与える。その位相は Sagnac 効果による位相変化に等しい。グレーティングおよび AOM の回折角は ~ 10 mrad と小さいため、左右両回り光が別の光路を通るためのドリフトも、また、光学要素の配置誤差により生じる両光間の光路差 (これもドリフト要因である) も小さくおさえられる^{50, 51)}。また、光ファイバ中で両光間に周波数差があるとドリフト要因となるので^{40, 51)}、ここではこの点も配慮されている。

図 7 (b) は、APD 出力の位相を零位法で測定するために考案した電子回路構成であり、入力位相差 $\Delta\theta$ (Sagnac 効果) に比例した電気周波数 f_2 が、

$$f_2 = \frac{\Delta\theta + 2N\pi - \pi/2}{2\pi T_d} \quad (2)$$

のように得られる^{40, 50, 51)}。ここで、 N は整数、 T_d は遅延線 (CCD) の遅延時間である。結局、回転角速度に比例した周波数変化が出力となり、その波をカウントすれば回転角偏位がデジタルにわかり航法計算機入力として適している。

本方式による実験系では、単一モード半導体レーザを光源として用い、その直接周波数変調特性⁷²⁾を用いて注入電流に重畳した雑音によりコヒーレンスを等価的に低減し分解能向上を図った。その結果、5 deg/h なる短期分解能を達成した。ここでは、上記出力波の 1 カウントは、0.4 秒 (角度) に相当する。図 8 は回転検出例で、0.0042 deg/s は地球の自転速度である。本実験系により 5 桁以上のダイナミックレンジが得られている。

光ファイバジャイロは高性能な慣性航法用のみならず、将来の光集積回路の導入による低価格化が図られれば自動車用やロボット用等ジャイロ技術の新たな進展を

もたらすものと期待されている。ここで述べた方式以外にも幾つもの方式が研究されているほか^{8,9,73,74}、リング共振器を用いた構成法も研究が進められている⁷⁵⁻⁷⁷。

5. センサとしての各種利用方式

表2の分類に示した光ファイバをセンサとして用いる方式は、伝送路として用いる方式に比べてより積極的な応用形態といえ、そのなかでも単一モード光ファイバを光路とする干渉計のセンサ応用は高感度の達成に特徴があり多くの研究が見られる。とくに注目されているのは前述のとおり光ファイバジャイロである。このリング干渉計により、ファラデー効果を利用した電流計の構成手法⁷⁸や、加速度計を得る研究も行なわれている。以下では、リング干渉計以外のセンサ構成について述べよう。

5.1 光ファイバ干渉計センサ

マッハツェンダー型、ファブリーペロー型、マイケルソン型等、従来からの干渉計構成の多くが単一モード光ファイバを光路として実現され、高感度なセンサ応用の研究が進められている。たとえば、光ファイバに加わる外圧によりその屈折率変化(音響光学効果)と長さの変化が生じて伝播光の位相が変わる現象を利用した水中音響^{79,80}および空中音響計測⁸¹や、ニッケル等を光ファイバにコーティングしてその磁歪効果による圧力変化を用いた磁界・電流計等⁸⁴⁻⁸⁶がある。水中音響測定器としては、光ファイバのコーティング材により異なるが1~100 rad/atm・m^{82,83}、温度計としては、~100 rad/°C・mの感度⁸³が得られ、さらに光ファイバの低損失性によりループ状センサとして用いることで長さに比例した感度上昇が期待される。ファイバの伸縮を利用して高感度な加速度計を構成する試みもみられる^{88,89}。

実際の計測では微小信号を検出するために、信号に対して干渉光出力が最も高感度に応答するように動作点を適当に設定する必要がある。このような工夫を施して、~10⁻⁶ rad (信号帯域 1Hz) という微小位相の検出も報告され⁹⁰、この種のセンサがきわめて高感度になりうる事がわかる。実際、表2に示した特性が得られており、これは従来他の方式のセンサと同等ないしはそれを上回るものである。

まず、マッハツェンダー型の干渉計について述べよう。ここでは、一方のアームがセンサとして、他方がリファレンスとして用いられるのが一般的である。また、両者を空間的に並べれば、外的要因の空間的勾配が求められる⁹¹。温度計以外の用途では伝播光位相の温度ドリフトが問題となり、一般に信号としてはこのドリフト以上の

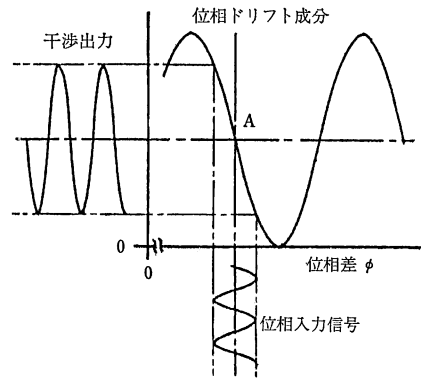


図9 ドリフト補償と動作点の設定

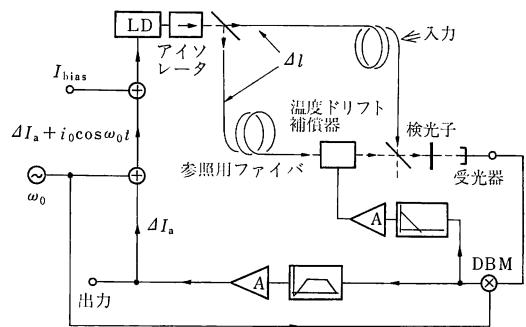


図10 半導体レーザーの直接FM特性を利用した零位法光ファイバセンサ^{95,96}

周波数成分のみを考える。この場合、ドリフトが信号入力の動作点を設定することになり(図9)、この変動はスケールファクタ変動をひき起こす。そこで、受光器出力の低周波成分を適当な光の位相器に帰還して温度ドリフトを補償し動作点を感度の最適位置(たとえば図9のA点)に保持する方法がとられるほか^{90,92}、一方の光波の周波数をAOMでシフトさせる光ヘテロダイン法も考えられている⁹³。前者のホモダイン法のほうが高感度化が図られるが、この方法ではファイバ内で偏波状態が変動すると、鮮明な干渉を得るために受光器前面に設ける検光子のため、やはりスケールファクタの変化が生じる。これは、電子回路で補償することもできる⁹⁴が、零位法の導入が有効である。

零位法を達成するためには良好な直線性・周波数特性をもつ光位相補償器が必要となる。図10に半導体レーザーの直接周波数変調特性を利用した方式を示す^{95,96}。単一モード半導体レーザーの出力光周波数は注入電流変化に比例する⁷²。一方、図のように両光路間に光路差Δlを与えると光源の周波数変化に比例した位相変化が得られる⁴¹。したがって、注入電流変化により信号位相変化を

相殺することができ零位法が実現される⁹⁵⁻⁹⁷⁾。図 10 では信号帯域より高い周波数 ω_0 (1 MHz) の信号を重畳し、出力中のこの周波数成分がゼロになるようにフィードバックする。ここでは、信号に比して振幅の大きな温度ドリフトはピエゾ素子を用いた光位相器にフィードバックしている。図 11 は本構成をハイドロフォンとして用いた場合の実験例で、(a) は入力音響波形 (40 kHz)、(b) は本センサの出力、つまり半導体レーザへの注入電流変化である^{95,96)}。

ファブリーペロー型の干渉計構成⁹⁸⁻¹⁰⁰⁾ では、光ファイバ中の位相変化に対し出力が他の干渉計構成より高感

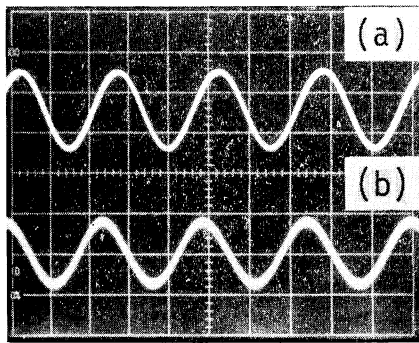


図 11 図 10 の方式により得られた水中音響信号 (40 kHz)
(a) は超音波トランスデューサへの入力信号、
(b) は半導体レーザへの注入電流変化、 $\Delta I_a = 500 \mu A_{p-p}$ ^{95,96)}

度に応答する。また、1本の光ファイバでセンサが構成されることも利点である。さらに、従来のハーフミラーを対向させる構成では実現が困難であった光路の長い、すなわち、フリースペクトルレンジの小さい干渉計が可能となる。ハイドロフォンや温度計への応用が研究されている⁹⁸⁾。図 12 は、光ファイバファブリーペロー干渉計が波長分解能の高いフィルタとして作用することを利用して、光ファイバセンサの光源として重要な半導体レーザのスペクトル形状を直接測定する光学系構成である^{101,130)}。図 12 では偏波維持光ファイバが導入されたほか、位相変調器により波長掃引を行なうとともにその掃引が発振スペクトルの中央を中心とするよう動的に安定化が図られている。図 13(a) は長さ 1 m のファイバを

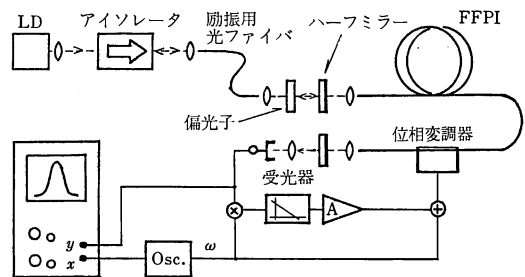
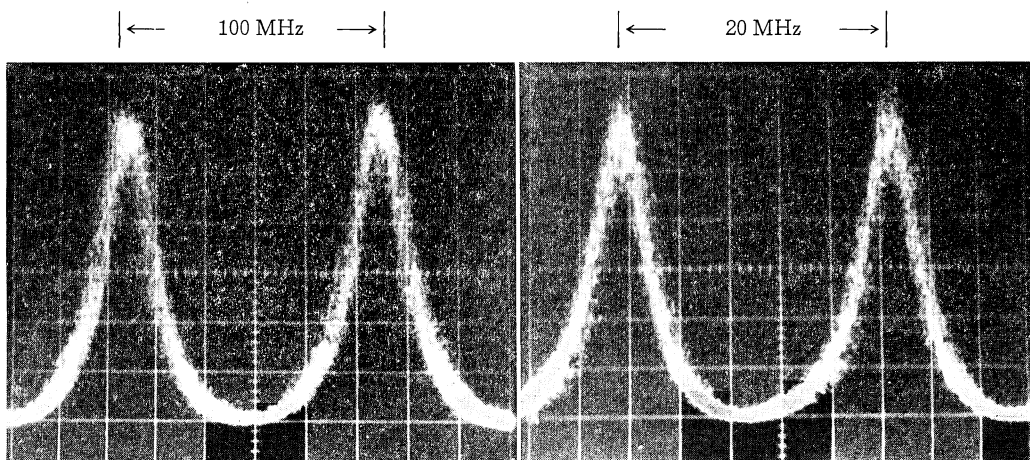


図 12 光ファイバファブリーペロー干渉計による半導体レーザ発振スペクトル形状の直接測定系
偏波維持単一モード光ファイバが用いられている^{101,130)}。



(a) フリーランニング状態の発振スペクトル
1 m の偏波維持光ファイバを利用、フリースペクトルレンジ 100 MHz.
(b) 戻り光により狭められた発振スペクトル
5 m の偏波維持光ファイバを利用、フリースペクトルレンジ 20 MHz.

図 13 光ファイバファブリーペロー干渉計による半導体レーザ発振スペクトル形状の直接測定結果。周波数スケールを校正するための二つの共振ピークが含まれるように掃引振幅を調節している^{101,130)}。

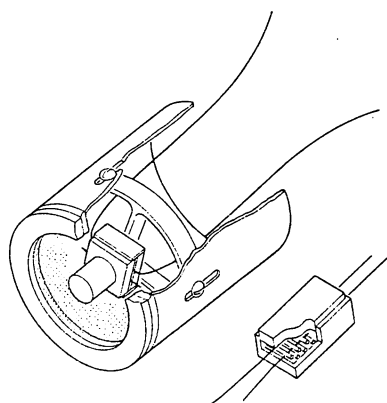


図 14 マイクロベンディング損失効果を利用した光ファイバハイドロフォン¹¹²⁾

用いて測定した LD のフリーラング状態のスペクトル形状であり、半値幅が約 20 MHz であることがわかる^{101,130)}。図 13 (b) は 5 m のファイバにより測定したもので^{101,130)}、LD に多少光を帰還させることによってスペクトル幅が狭められること¹⁰²⁾を示している。

上記の各干渉計ではいずれもドリフトを能動的に安定化しているのに対し、偏波維持光ファイバ中の偏波の直交する二つのモードを利用したり¹⁰³⁾、3 入力 3 出力の光ファイバ方向性結合器を利用して¹⁰⁴⁾、受動的にその安定化を図る手法も開発されている。また、温度¹⁰⁵⁾あるいは圧力¹⁰⁶⁾に対する伝播光位相変化の感度を低減するために特別なコーティングを施したファイバの研究も進められている。

このほか、光ファイバをカテーテルとして用い、血管内にレーザ光を放射して、赤血球により散乱されて再びファイバ中を伝播して戻ってくる光が血流速度に比例したドップラーシフトを受ける現象を利用した血流計の開発も試みられている^{107,108)}。

5.2 干渉計以外のセンサ応用

光ファイバ干渉計以外の構成で、光ファイバをセンサとして応用したものの一例を図 14 に示す¹¹²⁾。これは多モード光ファイバに周期数 mm のうねりを与えたとき放射が生じて損失が増加する効果 (マイクロベンディング損失) を利用したもので、図のような構成で水中音響センサが得られる。ここでは、 0.9×10^{-2} Pa (出力 110 μ W, 信号帯域 1 Hz) が最小受信圧力である¹¹²⁾。また、光ファイバ中での偏波のファラデー回転を利用し、光ファイバをループ状に巻いて感度向上を図った電流・磁界計が考案されている^{113,114)}。しかし、光ファイバの非軸対称性による偏波回転の非直線性に対策が必要であ

る¹¹⁵⁻¹¹⁷⁾。

6. ま と め

光ファイバのセンシング技術への応用について概観した。表 2 に示したようにすでに多くの研究が見られる。光ファイバの伝送路としての利用形態は技術的にはとくに新しいものではないが、光ファイバの特徴を生かした特殊環境下での計測手法として重要であり実用化も進んでいる。センサとしての利用は、その実用化は今後に待たれるところであるが、このうち干渉計応用はその高い感度が注目されており、体系的な研究が進められて、 10^{-6} rad という受光器のショット雑音レベルと同一オーダーの微小位相測定が達成されている。光ファイバジャイロは、この分野の最も重要なセンサである。

前述のとおり本分野では半導体光源の利用が主であり、たとえばその直接周波数変調特性等を利用することにより、従来になかった新しい信号取得・処理手法が開拓される可能性がある。偏波維持光ファイバの伝播特性や半導体光源の特性等^{121,122)}とセンサシステムの性能限界との関係のより詳細な検討を進め、さらにそれらを考慮したセンサシステムの最適構成法の確立が今後の課題である。マイクロオプティクス¹²³⁾や光ファイバを用いた機能素子¹²⁴⁻¹²⁸⁾の利用、さらには将来の光集積回路¹²⁹⁾の導入による実装技術の確立によって、光ファイバを利用したセンシング技術はより高い性能とより広い応用分野を開拓するものと期待される。

なお、文献 3)~11) は本分野に関してこれまでに著された解説論文である。日頃ご助言をいただく千葉工業大学丹羽登教授、東京大学工学部東口実教授、大越孝敬教授に感謝申し上げる。

文 献

- 1) 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫: 光ファイバ (オーム社, 1983).
- 2) 丹羽 登, 佐下橋市太郎, 寺西昭男, 橋本 康, 保立和夫, 吉田安徳: ライフサイエンスを測る—超音波・画像・光計測入門—, 丹羽 登編 (オーム社, 1983).
- 3) 根本俊雄, 本田辰篤, 森川滝太郎, 岩崎 俊, 遠藤道幸: 電子通信学会技報, **OQE 78-124** (1979) 41.
- 4) 保立和夫: 光学技術コンタクト, **18** (1980) 8.
- 5) 松村宏善: 日経エレクトロニクス, 7月6日号 (1981) 154.
- 6) 保立和夫: 日本の科学と技術, **22** (1981) 40.
- 7) T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Sigel, J. H. Cole, S. C. Rashleigh and R. G. Priest: IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 626.
- 8) 保立和夫, 東口 実, 丹羽 登: 計測と制御, **20** (1981) 937.
- 9) 保立和夫, 東口 実, 丹羽 登: 光ファイバセンサ技術資料集 (分担執筆) (第1インターナショナル, 1983).

- 10) S. Ezekiel and H.J. Arditty: *Fiber-Optic Rotation Sensors* (Springer, Berlin, 1982).
- 11) 河村達雄, 原田達哉, 岸 敬二: 電気学会雑誌, **97**(1977) 987.
- 12) 浜崎祐司, 工原美樹, 加藤正昭, 多田敏二, 竹内精一, 大野 豊: 電子通信学会技報, **OQE80-4** (1980) 19.
- 13) 久間和生, 滝岡孝司, 田井修市, 布下正宏, 井田芳明: 電子通信学会総合全国大会, 4-80 (1983).
- 14) K. Shibata: *1st Int. Conf. on Optical Fiber Sensors*, London (1983) p. 164.
- 15) 岡田 明, 田中 啓, 寺井清司: 電子技術, **21** (1979) 56.
- 16) 石川重太, 浜村武重, 土肥規矩夫, 野中俊輔: 電子通信学会総合全国大会(1978) p. 229.
- 17) K. Kyuma, S. Tai, T. Sawada and M. Nunoshita: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 676.
- 18) 柏柳雄三, 城川潤二郎, 清水正信: 電子通信学会総合全国大会, 4-96 (1980).
- 19) 柏柳雄三, 田中高志, 菊田俊夫: 電子通信学会総合全国大会, 4-102 (1981).
- 20) 葉袋康雄, 斧田誠一, 阪本将三, 田中満雄: 電子通信学会総合全国大会, 4-102 (1980).
- 21) W. B. Spellman and D. H. McMahon: *Appl. Opt.*, **19** (1980) 113.
- 22) 田井修市, 久間和生, 布下正宏: 電子通信学会技報, **MW-81-81** (1981) 55.
- 23) 大場良次, 古賀啓介, 生水利明: 計測自動制御学会学術講演会 (1981.7) p. 273.
- 24) H. Todoroki, *et al.*: *Chem. Pharm. Bull.*, **28** (1980) 1337.
- 25) O. P. Gandhi and T. C. Rozzell: *Microwave J.* (1975) 58.
- 26) T. Harada, T. Kawamura and K. Kishi: *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, **PAS-91** (1972) 494.
- 27) M. Iiyama, T. Kamiya and H. Yanai: *Appl. Opt.*, **20** (1981) 4296.
- 28) 松田美一, 丸井智敬: 電子通信学会総合全国大会, 4-98 (1980).
- 29) V. Vali and R. W. Shorthill: *Appl. Opt.*, **15** (1976) 1099.
- 30) E. J. Post: *Rev. Mod. Phys.*, **39** (1967) 475.
- 31) W. R. Leeb, G. Schiffner and E. Scheiterer: *Appl. Opt.*, **18** (1979) 1293.
- 32) T. Callaghan, S. Callaghan, J. Hanse, C. Tettermer and F. Aronowitz: *Symposium Gyro Technol.*, Stuttgart (1982).
- 33) F. Aronowitz: *Laser Appl.*, **1** (1971) 133.
- 34) W. C. Goss and R. Goldstein: *Opt. Eng.*, **18** (1979) 9.
- 35) S. C. Lin and T. G. Giallorenzi: *Appl. Opt.*, **18** (1979) 915.
- 36) V. Vali and R. W. Shorthill: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **77** (1976) 110.
- 37) R. Goldstein and W. C. Goss: *Opt. Eng.*, **18** (1979) 381.
- 38) J. L. Davis and S. Ezekiel: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **157** (1978) 131.
- 39) K. Hotate, Y. Yoshida, M. Higashiguchi and N. Niwa: *Electron. Lett.*, **16** (1980) 941.
- 40) K. Hotate, N. Okuma, M. Higashiguchi and N. Niwa: *Int. Conf. on Fiberoptic Rotation Sensors and Related Technol.*, MIT, Cambridge (1981).
- 41) K. Hotate, Y. Yoshida, M. Higashiguchi and N. Niwa: *Appl. Opt.*, **20** (1981) 4313.
- 42) W. C. Goss, R. Goldstein, H. T. Fearehaugh and O. G. Ramer: *Appl. Opt.*, **19** (1980) 852.
- 43) C. H. Bulmer and R. P. Moeller: *Opt. Lett.*, **6** (1981) 572.
- 44) S. K. Sheem: *Appl. Phys. Lett.*, **37** (1980) 869.
- 45) T. Iwana and T. Nakagami: *Int. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, 2803-14, Tokyo (1983).
- 46) R. Ulrich: *Opt. Lett.*, **5** (1980) 173.
- 47) R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: *Opt. Lett.*, **6** (1981) 198.
- 48) R. F. Cahill and E. Udd: *Appl. Opt.*, **19** (1980) 3054.
- 49) J. L. Davis and S. Ezekiel: *Opt. Lett.*, **6** (1981) 505.
- 50) K. Hotate, N. Okuma, M. Higashiguchi and N. Niwa: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 331.
- 51) K. Hotate, N. Okuma, M. Higashiguchi and N. Niwa: *Symposium Gyro Technol.*, Stuttgart (1982).
- 52) 保立和夫, 大熊直彦, 東口 実, 丹羽 登: 計測自動制御学会論文集, **19** (1983) 319.
- 53) D. E. Thompson, D. B. Anderson, S. K. Yao and B. R. Youmans: *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978) 940.
- 54) W. S. Brockett, J. M. Martin, J. M. Hoimes and T. L. Johnson: *Int. Conf. on Lasers* (1979).
- 55) B. Culshaw and I. P. Giles: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 690.
- 56) T. Yoshino, T. Ose, H. Tai, T. Kubota and K. Kurosawa: *Int. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, 28 c 3, Tokyo (1983).
- 57) K. Böhm, P. Marten, K. Petermann and E. Weidel: *Symposium Gyro Technol.*, Stuttgart (1982).
- 58) C. C. Cutler, S. A. Newton and H. J. Shaw: *Opt. Lett.*, **5** (1980) 488.
- 59) K. Böhm, P. Marten, K. Petermann, E. Weidel and R. Ulrich: *Electron. Lett.*, **17** (1981) 352.
- 60) G. Shiffner, W. R. Leeb, H. Krammer and J. Wittmann: *Appl. Opt.*, **18** (1979) 2096.
- 61) R. Ulrich and M. Johnson: *Opt. Lett.*, **4** (1979) 152.
- 62) T. Okoshi: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) 879.
- 63) M. D. Shupe: *Appl. Opt.*, **19** (1980) 654.
- 64) K. Böhm, K. Petermann and E. Weidel: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 180.
- 65) G. Shiffner, B. Nottbeck and G. Schöner: *Int. Conf. on Fiberoptic Rotation Sensors and Related Technol.*, MIT, Cambridge (1981).
- 66) R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 282.
- 67) S. Ezekiel and J. L. Davis: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 457.
- 68) R. A. Bergh, B. Culshaw, C. C. Cutler, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 563.
- 69) H. C. Lefevre, R. A. Bergh and H. J. Shaw: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 454.
- 70) B. Y. Kim, H. C. Lefevre, R. A. Bergh and H. J. Shaw: *1st Int. Conf. on Optical Fibre Sensors*, London (1983) p. 136.
- 71) 大木永光, 長井 賢, 清水基夫, 梶谷光男, 上野義人: 電子通信学会技報, **OQE 82-24** (1982).
- 72) S. Kobayashi, Y. Yamamoto and T. Kimura: *Electron. Lett.*, **17** (1981) 350.
- 73) S. C. Rashleigh and W. K. Burns: *Opt. Lett.*, **5** (1980) 482.
- 74) H. Arditty, H. J. Shaw, M. Chodorow and R. Kompfner: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **157** (1978) 138.
- 75) G. A. Sanders, M. G. Prentiss and S. Ezekiel: *Opt. Lett.*, **6** (1981) 569.
- 76) L. F. Stohes, M. Chodorow and H. J. Shaw: *Opt. Lett.*, **6** (1981) 572.

- 7 (1982) 288.
- 77) R. G. Walker and C. D. W. Wilkinson: Appl. Opt., **22** (1983) 1029.
- 78) H. J. Arditty, Y. Bourbin, M. Papuchon and C. Puech: Int. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, WL 3, San Francisco (1981).
- 79) J. A. Bucaro, H. D. Dardy and E. F. Carome: Appl. Opt., **16** (1977) 1761.
- 80) J. A. Bucaro and E. F. Carome: Appl. Opt., **17** (1978) 330.
- 81) G. S. Maurer, L. Schuetz, J. H. Cole and J. A. Bucaro: Opt. Lett., **7** (1982) 503.
- 82) G. W. McMahon and P. G. Cielo: Appl. Opt., **18** (1979) 3720.
- 83) N. Lagakos, E. V. Schnaus, J. H. Cole, J. Jarzynski and J. A. Bucaro: IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 683.
- 84) A. Yariv and H. V. Winsor: Opt. Lett., **5** (1980) 87.
- 85) A. Dandridge, A. B. Tveten, G. H. Sigel, E. J. West and T. G. Giallorenzi: Electron. Lett., **16** (1980) 408.
- 86) K. P. Koo and G. H. Sigel: Opt. Lett., **7** (1982) 334.
- 87) A. Dandridge, A. B. Tveten and T. G. Giallorenzi: Electron. Lett., **17** (1981) 524.
- 88) A. B. Tveten, A. Dandridge, C. M. Davis and T. G. Giallorenzi: Electron. Lett., **16** (1980) 408.
- 89) A. D. Kersey, D. A. Jackson and M. Corke: Electron. Lett., **18** (1982) 559.
- 90) D. A. Jackson, A. Dandridge and S. K. Sheem: Opt. Lett., **5** (1980) 139.
- 91) K. P. Koo and G. H. Sigel: Topical Meeting on Optical Fiber Communication, TUB 2, New Orleans (1983).
- 92) D. A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge and A. B. Tveten: Appl. Opt., **19** (1980) 2926.
- 93) T. J. Hall: Electron. Lett., **15** (1979) 405.
- 94) 鯉坂秀夫, 保立和夫, 丹羽 登: 海洋音響研究会会報, **10** (1983) 62.
- 95) 保立和夫, 佐下橋市太郎, 丹羽 登: 電子通信学会技報, **OQE 82-57** (1982) 1.
- 96) K. Hotate, I. Sagehashi and N. Niwa: Int. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, 27 c 3-2, Tokyo (1983).
- 97) A. Dandridge and A. B. Tveten: Opt. Lett., **7** (1982) 279.
- 98) T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh and T. Ose: IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 1624.
- 99) P. G. Cielo: Appl. Opt., **18** (1979) 2933.
- 100) Y. Ohtsuka: Appl. Opt., **21** (1982) 4316.
- 101) 保立和夫, 小笹通司, 東口 実: 計測自動制御学会学術講演会 (1983).
- 102) K. Kikuchi and T. Okoshi: Electron. Lett., **18** (1982) 10.
- 103) S. C. Rashleigh: Appl. Opt., **20** (1981) 1498.
- 104) K. P. Koo, A. B. Tveten and A. Dandridge: Appl. Phys. Lett., **41** (1982) 616.
- 105) N. Lagakos and J. A. Bucaro: Appl. Opt., **20** (1981) 3276.
- 106) N. Lagakos, T. R. Hickman, J. H. Cole and J. A. Bucaro: Opt. Lett., **6** (1981) 443.
- 107) T. Tanaka and G. B. Benedek: Appl. Opt., **14** (1975) 189.
- 108) H. Nishihara, J. Koyama, N. Hoki, F. Kajiyama, M. Hironaga and M. Kano: Appl. Opt., **21** (1982) 1785.
- 109) K. Kyuma, S. Tai, K. Hamanaka and M. Nunoshita: Appl. Opt., **20** (1981) 2424.
- 110) S. C. Rashleigh: Opt. Lett., **6** (1981) 19.
- 111) W. Eickhoff: Opt. Lett., **6** (1981) 204.
- 112) J. N. Fields and J. H. Cole: Appl. Opt., **19** (1980) 3265.
- 113) 齋藤成文, 藤井陽一, 横山幸嗣, 大林周逸: 電気学会全国大会 (1977) p. 1927.
- 114) A. Papp and H. Harms: Appl. Opt., **19** (1980) 3729.
- 115) T. Findakly: Appl. Opt., **20** (1981) 3989.
- 116) R. H. Stolen and E. H. Turner: Appl. Opt., **19** (1980) 842.
- 117) 松村宏善, 勝山俊夫, 菅沼庸雄: 電子通信学会総合全国大会 (1981).
- 118) J. H. Lyle and C. W. Pitt: Electron. Lett., **17** (1981) 245.
- 119) A. Rosiewicz and M. H. Gray: Int. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, WJ 3, San Francisco (1981).
- 120) G. H. Sigel and E. J. Friebele: *ibid.*, WJ 1 (1981).
- 121) A. Dandridge, A. B. Tveten, R. O. Miles, D. A. Jackson and T. G. Giallorenzi: Appl. Phys. Lett., **38** (1981) 77.
- 122) A. Dandridge and A. B. Tveten: Appl. Opt., **22** (1983) 310.
- 123) 松下茂雄, 小林功郎, 杉元重時: 電気四学会連合大会, **22-2** (1980) 4-3.
- 124) W. Eickhoff: Electron. Lett., **16** (1980) 762.
- 125) R. A. Bergh, G. Kotler and H. J. Shaw: Electron. Lett., **16** (1980) 260.
- 126) H. C. Lefevre: Electron. Lett., **16** (1980) 778.
- 127) R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: Opt. Lett., **5** (1980) 479.
- 128) S. K. Sheem and T. G. Giallorenzi: Opt. Lett., **4** (1979) 29.
- 129) 末松安晴, 伊賀健一: テレビジョン学会誌, **35** (1981) 400.
- 130) K. Hotate, M. Kozasa and M. Higashiguchi: European Conference on Optical Communication, Geneva (1983).