

解説

光ファイバ応用干渉計測技術

今井 正明・大塚 喜弘

北海道大学工学部数物系共通講座 〒060 札幌市北区北13条西8丁目

(1984年8月20日受理)

Fiber-Optic Techniques for Interferometric Measurements

Masaaki IMAI and Yoshihiro OHTSUKA

Department of Engineering Science, Faculty of Engineering, Hokkaido University,
Kita-13 jo, Nishi-8 chome, Kita-ku, Sapporo 060

1. ま え が き

石英系光ファイバは2~5 dB/kmと低損失であり、細径・軽量、耐水・耐火性に優れていて、さらに高絶縁性で無誘導といった特徴を備えているために、光通信用線路としてのみならずファイバセンサー・計測用伝送路としても使用されている¹⁾。近年、とくに光計測に適した単一モードファイバおよび偏波保持(定偏波)ファイバが開発されて、光波の振幅・波長(周波数)特性のほか位相・偏波特性を有効に利用しようとする試みが盛んになってきた²⁾。このようなファイバを用いて、被測定物理量である振動・変位、音圧、温度等によるファイバ中の光の位相変化を検出するのがファイバ干渉計測の原理である。すなわちファイバ干渉計測においては光ファイバ自体が高感度・高性能なセンサーになることのほかに、ファイバが細径で軽く曲げやすく長尺のものもコンパクトにまとめることができ、光学系を構成する上で大きな利点を有している。

本稿ではこのように新たに形成されつつある「光ファイバ応用干渉計測」において、安定に感度の高い計測を行なうためのファイバ計測技術を紹介する。最近の応用物理の技術ノート³⁾には光ファイバセンサーのための実験技術が報告されているが、本解説では光ファイバ自身を応用した光コンポーネント、デバイスおよびそれらを用いた干渉計測技術についてまとめている。ここでは光ファイバカップラー、光ファイバ偏光子と偏波コントローラ、光ファイバアイソレータ、光ファイバ波長板(位相

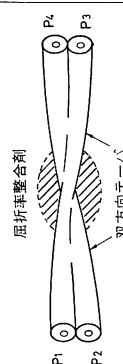
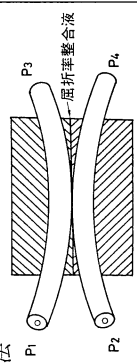
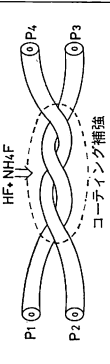
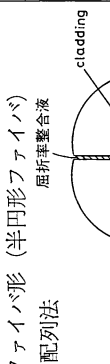
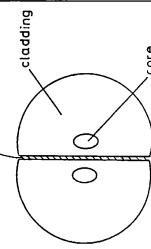
板)、さらに光ファイバ位相変調技術、光ファイバ干渉計測におけるノイズとそれを補償する方法等について概説を試みる。

2. 光ファイバカップラー

光ファイバを用いて光波干渉計測を行なう場合、フブリーペロー型⁴⁾のような1光路多光束干渉法を除いて信号光と参照光に分割するあるいはそれらを合流するのにビームスプリッターが必要である。従来このような分岐合流のために半透鏡(ハーフミラー)や偏光分割プリズムが用いられてきたが、光軸合せには微細な調整が必要でありかつその光学系を長時間安定に保持するのが困難であった。この問題を解決するのが光ファイバ自身で分岐・合流を行なう「光ファイバカップラー」である。この光分岐・合流回路は光ファイバ通信システムにおいてデータバスからの光信号をモニターしたりあるいは信号を送り込むために開発されたものであるが、光通信システムのみならずファイバセンサー等の計測システムにも応用することができる。

光ファイバカップラーは単一モードファイバおよび偏波保持ファイバを対象とした計測用カップラーに限定すると、製作方法から次の5種類に分類することができる。すなわち、①熱融着法⁵⁻¹⁰⁾、②研磨法¹¹⁻¹⁵⁾、③ケミカルエッチング法¹⁶⁻¹⁹⁾、④エッチング+熱融着法^{20,21)}、⑤自己配列法²²⁻²⁴⁾である。またこれらは分岐部の形状からそれぞれ①バイコンカル(双方向)テーパ形、②並行形、③④ひねり形、⑤D-ファイバ(半円形ファイバ)形に分

表 1 計測用光ファイバカップラーの特性

分類	種類	分岐比 (%)	挿入損失 (dB)	使用ファイバ	備考
(i) バイコニカルテーパー形 熱融着法		0~100	0.2~1.0	S ⁵⁾ SP ⁶⁾ SP ⁷⁾	消光比 (CVD 技術応用) 消光比 < -15 dB (CVD 技術応用)
		50 (3×3 ポート) 0~100 (周囲媒質の屈折率変化)	≒3 2~5 <1.5 0.1~0.2 <1.0	S ⁸⁾ S ⁹⁾ S ¹⁰⁾	
(ii) 並行形 研磨法		0~70	0.5	S ¹¹⁾ S ¹²⁾	完全変換時のパワー比 -50 dB
		0~100 0~100 0~70 40~60 (入射偏光面変化)	0.3~0.5 <1 1 <0.5	S ¹³⁾ SP ¹⁴⁾ SP ¹⁵⁾	完全変換時のパワー比 -35 dB 消光比 < -20 dB 消光比 < -40 dB
(iii) ひねり形 ケミカルエッチング法		50	2	S ¹⁶⁾	方向度 < -25 dB
		30~50 30~45 0~70 (ガラスゲルの温度変化)	<1 <1 <1	S ¹⁷⁾ S ¹⁸⁾ S ¹⁹⁾	RTV シリコン充填 補強 ガラスゲル充填補強
(iv) ひねり形 エッチング+熱融着法		5~25 20~45 (入射偏光面変化)	0.1~1.0 ≤0.2	S ²⁰⁾ SP ²¹⁾	消光比 -13~-21 dB
		50 10~50 50	<3 <0.2 1.6	S ²²⁾ SP ²³⁾ SP ²⁴⁾	方向度 < -60 dB 消光比 -21 dB 消光比 -20 dB
(v) D-ファイバ形 (半円形ファイバ) 自己配列法					

S: 単一モードファイバ, SP: 偏波保持ファイバ, 分岐比 = $P_4 / (P_3 + P_4) \times 100$ (%), 挿入損失 = $-10 \log_{10}(P_3 + P_4) / P_1$ (dB), 方向度 = $10 \log_{10}(P_2 / P_1)$ (dB).

けられる。表1には計測用光ファイバカップラーの特徴と分岐比、挿入損失、使用ファイバをまとめて示した。干渉計測用カップラーとしては低損失で分岐比が50%に近く、入射光の偏波特性に依存せず製作が容易で熱、振動に対して安定であることが望ましいが、このほかに分岐比を任意に制御する目的からは研磨法¹¹⁻¹⁵⁾が優れている。若干の分岐比の調整には周囲媒質の屈折率⁸⁾および温度¹⁹⁾を変化させたり、テーパー部分に張力を加え

て結合長を変えたり¹⁰⁾、あるいは入射直線偏光の偏光面^{15, 21)}を変えることにより行なっている。

3. 光ファイバ偏光子

種々の方法で製作した光ファイバカップラーは偏光特性をもつことがある。これは熱融着あるいはケミカルエッチングなどの方法により製作する過程で加えた張力によって結合部分に応力が生じて²⁵⁾、しかもファイバ断面

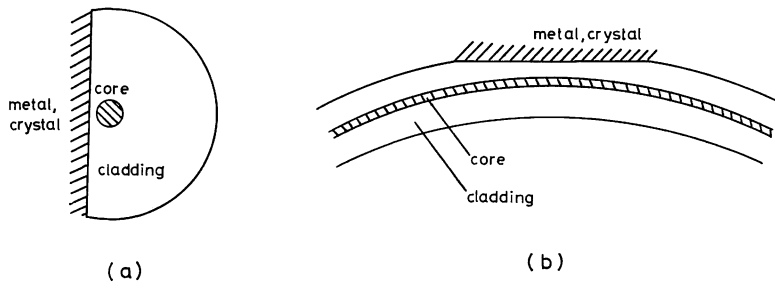


図1 単一モード光ファイバ偏光子
(a) 断面図, (b) 側面図.

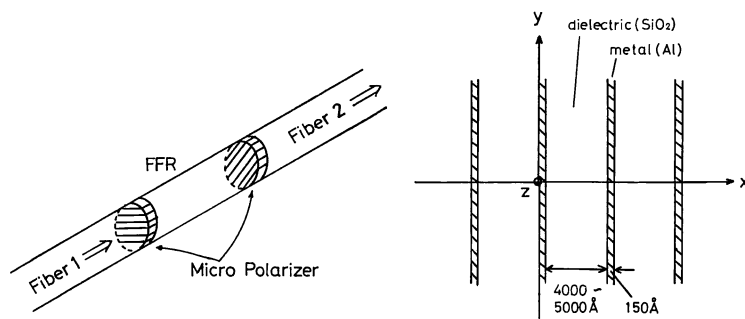


図2 ファイバタイプ偏光子の構造 (右図) とそれを用いた微小アイソレータ³¹⁾ (左図)

内で異方性の歪分布になっていることおよび結合部分のコア自体が円形から楕円形に歪んでいることが考えられる。このようなカップラーでは直線偏光を入射したとき出射端では楕円偏光になり、かつ入射直線偏光の偏光方向によって出射楕円偏光の主軸の向きおよび分岐比が異なる。このカップラーを用いて干渉実験を行なうと干渉効率が低下して、しかも入射直線偏光の偏波面が時間的に変動する場合には出射光の強度が揺らいで偏波ノイズとなる (7.2 参照のこと)。

そのためにファイバ出射端の偏波面を揃えるのに光ファイバ自身で偏光子を形成することが考えられた。単一モードファイバの側面をクラッド層がほとんどなくなるまで研磨して、そこに金属 (Al, Au) の薄膜を蒸着するか²⁶⁾、複屈折性の結晶片 ($\text{KBsO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ²⁷⁾) を貼り付ける (図1)。これらの偏光子は、① TE_0 モードと TM_0 モードの減衰の違いを利用するか、② TE_0 モードのカットオフを利用する (TM_0 モードにはカットオフがない) かにより、前者では 14 dB の消光比が得られて、後者では最大 60 dB の消光比が報告されている。さらにファイバのプリフォームの段階で偏心構造にするか²⁸⁾、あるいは組成の異なる半円形のクラッド構造を二つ並べてプリフォームにして²⁹⁾、それらを線引した後にエッチングし

て金属膜を蒸着する方法も提案された。

これらのタイプとはまったく異なって、ファイバ端面に金属と誘電体の薄膜を周期的に形成するファイバ偏光子が作製された³⁰⁾。図2に示すように SiO_2 膜を 4000 ~ 5000 Å, Al 膜を 150 Å の膜厚にして、全体を 20 ~ 30 μm の厚さまで交互に蒸着を繰り返す。これをファイバコアとして外側にクラッド材を付けて線引きすることにより光ファイバの寸法に整合した多層膜構造ファイバ偏光子ができる。さらに二つのファイバ偏光子の間にベルデ定数の大きい常磁性ガラス (たとえば FR-5) を挟んだ構造にすると、直流磁界を印加することによりファイバタイプのアイソレータになる³¹⁾。

このほかに偏波保持ファイバ^{*1}において E_x, E_y 偏波モードの減衰の違いを利用すると、一方の偏波モードのみを伝播させることができる。これが単一偏波ファイバ³²⁾であり、これまでに蝶形 (ポータ³³⁾) および 2重クラッド構造³⁴⁾が提案されている。さらにこれらの単一偏波ファイバを曲げたり³⁵⁾、テーパ状にすること³⁶⁾により 20 ~ 30 dB 以上の消光比をもつファイバ形偏光子が実現している。さらに大きい消光比を得るために、

*1 偏波保持ファイバについては文献 2) の 2.3.2 の項で詳しく述べてあるので参照されたい。

ファイバを十数回ドラムに巻き付けて直交偏波モード間の減衰定数差を付けることが検討された³⁷⁾。

4. ファラデー形アイソレータ

ファラデー効果は磁気光学効果の一つであり、透明体に磁界を印加したとき入射光の偏波面が伝播するにつれて回転する現象である。このファラデー回転角は

$$\theta_F = V r \mathbf{H} \cdot \mathbf{L} = V r H L \cos \varphi \quad (1)$$

で与えられて、 Vr はベルデ定数、 \mathbf{H} は磁界ベクトル、 \mathbf{L} は媒質中の光路ベクトルを表わす。石英ファイバのベルデ定数は鉛ガラスやFR-5ガラスよりも小さいが、長尺ファイバを使うことにより感度向上の可能性が示唆された³⁸⁾。このファラデー回転角を測定することによって、印加磁界の大きさを検出して磁界・電流センサーに応用する試みもなされた³⁹⁾。しかし通常の単一モードファイバでは周囲の温度、外力によってファイバ内に複屈折が生じて、それが変動することによる感度の低下が問題になった。偏波保持ファイバを用いて、ビート長と周期が合った交番磁界を印加することにより、ファラデー効果の増加が計られた⁴⁰⁾。この構造で光ファイバアイソ

レータおよびサーキュレータが構成できることが示されている⁴¹⁾。ファイバ干渉計測の目的には小型でファラデー回転効率のよいデバイスが望ましく、そのためにファイバと印加磁界用コイルをそれぞれ数十回～数百回巻いた構造⁴²⁾(図3(a))あるいは複屈折ファイバのコイル周回長をビート長に等しくした構成例⁴³⁾(図3(b))が提案された。外部磁界の大きさを45°のファラデー回転角を与えるように設計して、入射・出射側の偏光子および検光子を互いに45°の角度に配置すると(図4)、前者では反射光強度が18dB、後者で25dBの消光比をもつアイソレータが得られている。さらにファイバタイプのアイソレータとして常磁性のFR-5ガラス材をファイバコアと同程度に細くして、両側から多層膜構造の偏光子^{30,31)}(図2参照のこと)で挟むことにより25dB以上の消光比をもつアイソレータが得られた⁴⁴⁾。

5. 光ファイバ波長板 (位相板)

光ファイバから出射する光の偏光状態を任意の偏光(直線偏光から円偏光)に変換するのに波長板が用いられる。光学結晶を使う代わりに光ファイバ自身で行なうことによって光学素子の表面での反射、散乱をなくすることができる。円形断面をもつ光ファイバ内に光学的異方性を発生させるのにファイバ軸に垂直に応力を加える^{45,46)}、振る^{47,48)}もしくは一様に曲げる⁴⁹⁻⁵²⁾などの方法がある。図5に光ファイバの断面に機械的圧力を加える電磁リレー(a)と光ファイバに誘起した複屈折性のモデル(b)を示す。外圧に平行な方向とそれと垂直な方

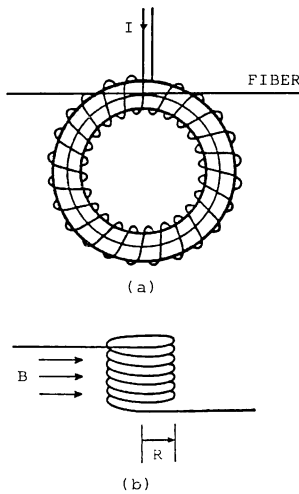


図3 ファラデー形アイソレータ
(a) トロイダル構造⁴²⁾, (b) ファイバループ構造⁴³⁾(偏波保持ファイバ)。

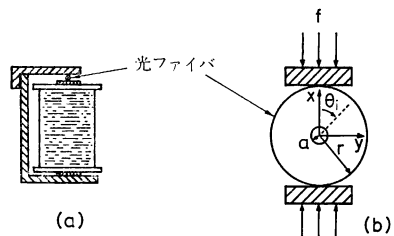


図5 電磁リレー(a)と光ファイバに誘起した複屈折性の説明(b)

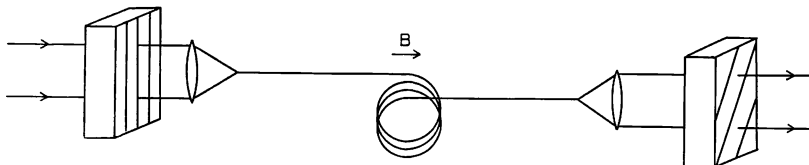


図4 ファイバアイソレータの構成

向を主軸 (x, y) にとれば、伝播定数差は $\beta_x \doteq kn_x, \beta_y \doteq kn_y$ として、

$$\Delta\beta = \beta_x - \beta_y = (8/\lambda r)(c_1 - c_2)f \quad (2)$$

で与えられる⁴⁵⁾。ここで f は単位長当りの外圧、 r はファイバのクラッド半径、 c_1, c_2 はそれぞれ直接光弾性定数および横光弾性定数を表わしている。石英系ファイバの場合に $c_1 - c_2 = 3.29 \sim 3.50 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{g}$ の値となり、入射レーザー光の偏光方向が x 軸から θ_i だけ傾いていると出射光は一般に楕円偏光になる。 $\theta_i = 45^\circ$ のとき、 $\Delta\beta l = \pi/2$ を満たすファイバ長 l で円偏波が得られる。

一方図6に示すように $x-z$ 面内で曲率半径 R で一様に曲がっているとき、コアの中心より外側 ($x \geq 0$) では引張り応力、内側 ($x < 0$) では圧縮応力が生じる⁵⁰⁻⁵²⁾。これらの応力によりファイバ断面内に剪断応力が発生して曲りの面内方向 (x 軸) とそれと垂直な方向では屈折率楕円体の変化分に違いが出る。その結果、 HE_{11} モードの伝播定数差は

$$\Delta\beta = \beta_x - \beta_y = -7.7 \times 10^7 (r/R)^2 \text{ (deg/m)} \quad (3)$$

となる。一例として $2r = 100 \mu\text{m}, 2R = 4\text{cm}$ とすると、 $\Delta\beta = 481 \text{ deg/m}$ となりピート長 75cm が得られる。この曲がりによる複屈折性を利用して、 $\lambda/2$ 板と $\lambda/4$ 板などの波長板を作ることができる。図7に二つの $\lambda/4$ 板と

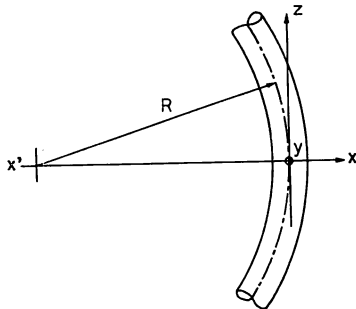


図6 光ファイバの一様曲り

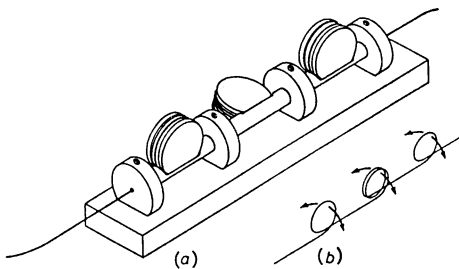


図7 光ファイバ偏波面制御装置⁵²⁾

(a) 装置の概略、(b) 各素子に回転の自由度があることを示す。

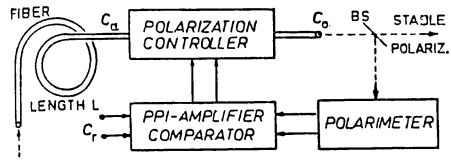


図8 能動形偏波制御装置の原理⁵³⁾

一つの $\lambda/2$ 板から成る偏波制御装置⁵²⁾の構成を示す。(a)は装置の概観、(b)は各ループを振ることによって偏波面を回転させるもので^{47, 48)}、偏波制御の補正をしている。

光ファイバを伝播した光の偏波面は周囲の温度、物理的擾乱により時間的に変動するようになる。偏波面の変動はファイバ出射端に偏光選択素子が挿入されている場合には強度変動に変換されるので抑圧する必要がある。そのために、ファイバからの出射光の一部 (C_0) をモニターして参照出力 (C_r) との差に比例した電気信号を電磁石などの偏波制御装置に帰還をかけて出力光強度を安定化している^{53, 54, 56)}。その方法の概略を図8に示す。 LiNbO_3 などの光学結晶を用いた装置⁵⁵⁾も考案された。帰還回路を使わない方法として、ファイバ干渉計の出射光を空間的に分割して、それぞれを異なる光軸方向を有する偏光板を透過させた後に検出して合成する。この方法によって偏波状態の変動に対して安定な出力が得られることが示された⁵⁷⁾。

6. 光ファイバ位相変調技術

光ファイバを伝播するレーザー光の位相変調を行なうのに円筒形電歪素子 (PZT: ジルコン・チタン酸鉛系磁器) が使われる。この円筒にファイバを巻き付けると、円筒の面内振動に対応してファイバ内を伝播する光の位相も変化する⁵⁸⁻⁶⁰⁾。図9に示すように PZT 円筒の内側と外側に張り付けた電極に電圧を印加すると、電界とは垂直方向に歪みを生ずる。その方向の圧電定数を d_{31} ($=1 \text{ \AA} \sim 3 \text{ \AA}/\text{V}^{61)}$ とすると、長さ L 、直径 D 、厚さ T をもつ円筒の長さ方向および直径方向の歪みの割合は共振周波数以下では次式により与えられる⁶²⁾。

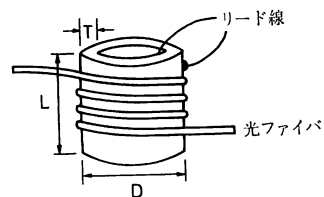
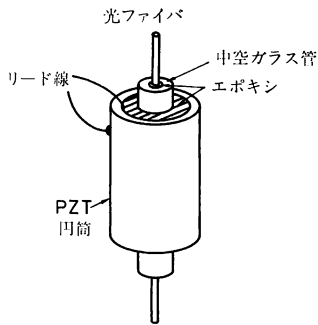
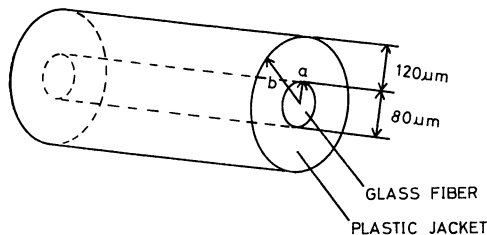


図9 円筒 PZT 素子

図 10 高周波用ファイバ位相変調素子⁶⁴⁾図 11 圧電性高分子薄膜被覆ファイバ⁷¹⁾

$$\left. \begin{aligned} \frac{dL}{dV} &= L \frac{d_{31}}{T} \\ \frac{dD}{dV} &= \pi D \frac{d_{31}}{T} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

PZT 円筒に光ファイバを数回～数十回巻き付けることにより、ファイバ長 1 m に換算して $0.1 \sim 0.2 \pi \text{ rad/V}$ の位相変化が得られる。円筒形 PZT の共振周波数は長さによって決まり、直径 3~5 cm、長さ 3 cm の寸法では 20~30 kHz の範囲にある⁶³⁾。これよりも高い周波数で駆動するためには 1 cm 以下の素子を使わなければならないと実用上困難となる。そこで図 10 に示すような円筒の内部に光ファイバを埋め込んだ構造が考えられた^{64,65)}。この構造において 7 MHz まで高感度に動作することが確認された⁶⁴⁾。また PZT 素子の代りに圧電性ポリフッ化ビニリデン (PVF₂ または PVDF) 薄膜も用いられている。1 辺が 10 cm 程度の大きさをもつ厚さ数十 μm のフィルム上に光ファイバを折り返して張り付けることにより、約 $4 \text{ rad/V} \cdot \text{m}$ という大きな位相変調効率が得られた^{66,67)}。さらに PVF₂ 薄膜を光ファイバの被覆材に用いて、直接光ファイバと一体化することも可能である⁶⁸⁾ (図 11 参照)。また電界センサーとしての応用も考えられて、1 km の被覆ファイバを使うと最小検出電界強度は $6 \mu\text{V/m}$ 程度と推定されている⁶⁹⁾。PVF₂ 以外の圧電被覆材としては P・VDF/TFE^{70,71)} (テトラフルオエチレン) あるいは P・VDF/TrFE⁷¹⁾ (トリ

フルオエチレン) などによるファイバ被覆も検討されている。この高分子材料は延伸配向の必要がなく、押し出し法などによりファイバに被覆することができる点に特徴がある。

7. 光ファイバ干渉計測におけるノイズ

光ファイバ干渉計測におけるノイズには、光源の出力変動、発振波長の変化およびスペクトル幅の変動 (これは半導体レーザーの場合に光帰還効果によって顕著である)、検出器のショットノイズ、あるいは電気回路の配線からの電磁誘導ノイズがある。このほかにも光学系の振動、熱膨張によって信号レベルにドリフトが生じる。さらに光ファイバ自体がノイズ源になりうる。すなわち光ファイバを伝播する光の振幅、位相が外界の変化に影響を受けるからである。この光ファイバのノイズとして曲げ損失によるノイズ、スペックルノイズ、位相ノイズが考えられる。

7.1 曲げ損失によるノイズ

光ファイバの導波機構はコアとクラッド境界における全反射により説明されるが、光ファイバが曲がっていると外側の境界において全反射の条件を満たさなくなり、光は外部へ放射される。これが曲りによる損失であり、光ファイバを被覆してケーブル化する段階でも生じる (マイクロベンディング損失⁷²⁾)。このため数 cm 以下の曲率半径を作らないように配慮すると同時に、曲げた部分が外部の擾乱によって振動しないように注意する必要がある。光ファイバの曲げ損失を検出することによって、圧力・音圧を測定することもできる⁷³⁾。

7.2 スペックルノイズ

多モードファイバの出射端においてモード間のランダムな干渉によってスペックルが生ずることはよく知られている²⁾。このスペックルの空間分布はファイバが外乱を受けたり、レーザー光の波長が変動すると揺らぐ。このときクラッドと被覆の境界で全反射する光 (クラッドモード) あるいは被覆を伝わる光とコアを伝播する導波モードとの間に結合が生じると光強度にノイズが発生する⁷⁴⁾。また光学系において光ファイバの接続部、あるいはファイバと検出器の間に不整合があればスペックルの空間分布の一部が遮ぎられて検出光強度は変動する。スペックルが現われない単一モードファイバでも直交偏波 (E_x, E_y) をもつ二つのモード間の結合によって、出射側に挿入した検光子からの光の強度は揺らぐ⁷⁵⁾。これをスペックルノイズと区別して偏波ノイズ^{75,76)}と呼んでいる。

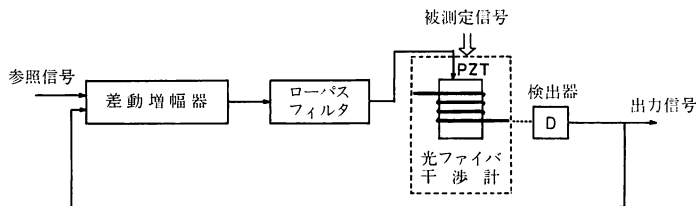


図12 位相ノイズを補償する能動的方法のブロックダイアグラム

7.3 位相ノイズ

光ファイバの互いに直交する偏波面をもつモードの位相差が外界の温度および圧力によって変化することによりマッハツェンダー干渉計などの2光束干渉ではノイズになる⁷⁷⁻⁷⁹。このような位相変動による出力信号の揺らぎ(ドリフト)を抑圧するのに検出した出力信号の一部を入力側へ帰還することによって補償する能動的(電気的)方法^{62,80,81}と光学的に $\lambda/4$ 位相板などを挿入して補償する受動的(光学的)方法^{82,83}がある。能動的方法の概略をブロックダイアグラムにして図12に示す。検出信号のうち低周波成分を取り出して、これを光ファイバ干渉計の位相変調器(6章参照のこと)に加えて光ファイバを伸縮させる。すなわち干渉計の感度を最大に保つように位相変動を補償している。この方法では補償できる位相変動の範囲は電歪素子(PZT)の最大位相推移量によって決まる。さらにドリフトが信号と同じ周波数成分をもっている場合にもこの方法は適用できない。これに対して光源に半導体レーザーを使用する場合、注入電流による発振波長の変化を利用することにより位相の変動を波長の変化に変換して帰還する方法が提案された⁸⁰。さらに光ファイバを伝播する光の位相が熱に敏感であることから、赤外線などの熱線をファイバに照射することによって比較的ゆっくりしたドリフトを除去できることが示されている⁸¹。

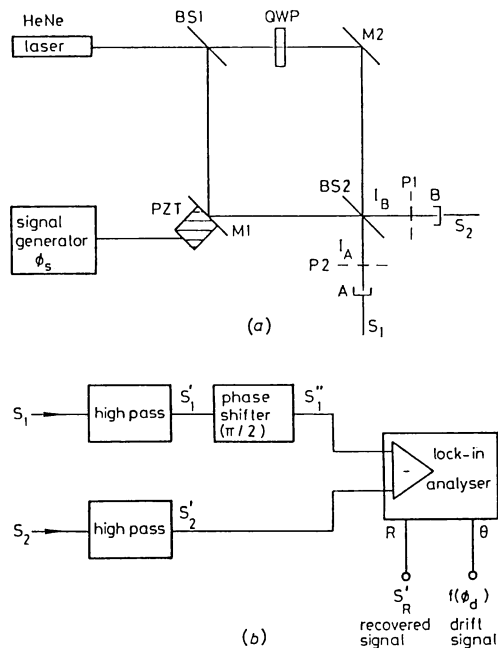
一方、受動的補償法としてマッハツェンダー干渉計の参照光路に $\pi/2$ の位相差を付けて、重ね合わせた後の透過および反射光を2乗検出して合成する方法⁸²がある。この方式のブロックダイアグラムを図13に示す。合波した光の強度は次のように置くことができる。

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_0 - I_1 \cos \phi_0 \\ I_B &= I_0 + I_1 \cos(\phi_0 + \pi/2) = I_0 - I_1 \sin \phi_0 \end{aligned} \right\} (5)$$

ただし ϕ_0 は2光束の光路差を表わしている。ここで信号光路を角周波数 ω_m で位相変調すると、基本周波数成分 ω_m をもつ光電流は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} S_1' &= -2 \sin \phi_a J_1(\phi_s) \sin \omega_m t \\ S_2' &= -2 \cos \phi_a J_1(\phi_s) \sin \omega_m t \end{aligned} \right\} (6)$$

ϕ_a はドリフトを表わす初期位相、 ϕ_s は位相変調の振幅である。これらの出力信号を組み合わせると $S_R = (S_1'^2 + S_2'^2)^{1/2}$ 、もしくは $S_{R'} = S_1'' + S_2'$ を作ると、 $S_R, S_{R'}$ の振幅は干渉計の光路差のドリフト(ϕ_a)に無関係に一定になる。ただし S_1'' は S_1' に 90° の位相差を導入したものである。また $S_{R'}$ の位相を検出することによりドリフトの位相推移がわかる。この合成する方法の代りに、二つの出力信号のうち最大値を選ぶ方法も提案されている⁸³。この場合式(5)の第2項目の直交成分を作り出すのに、PZT素子で変調したときに生ずる2周波成分を利用するか、あるいは光ファイバの直交する二つの偏波モードを用いることにより $\pi/2$ の位相差を付けている。さらにヘテロダイン検波方式も含めて、ファイバ干渉計においてドリフトを除去する検出方法が多数報告されている⁸⁴⁻⁸⁷。

図13 受動的補償法を組み込んだマッハツェンダー干渉計の構成(a)と信号処理のための電子回路⁸²(b)

8. む す び

光ファイバ干渉計測を行なう場合に必要と思われる光ファイバ部品、装置および実際に信号検出するときのノイズの問題とそれを補償する方法について概説した。今後光ファイバの製造技術の進歩に伴い高品質低価格化が進めばレーザー計測における光ファイバの応用がますますふえることは明らかである。その場合に干渉計測に必要な光部品をすべてファイバを用いて構成することは個々の部品間の光軸合せ等の接続が容易になり、表面・裏面からの反射散乱をなくするのに有利である。このように全ファイバ化された干渉計測システムの一つにスタンフォード大学で開発されたファイバジャイロ⁸⁸⁾がある。将来はさらに損失の少ない 1.5 μm 帯の単一モードファイバ (できれば偏波保持ファイバ) とその波長を発振することができる GaAlInP 半導体レーザーおよび量子効率のよい検出器を組み合わせた高分解能・高感度なファイバセンサーシステムが実現することと思われる。これとスペクトルアナライザーに代表される光集積回路を用いた信号処理技術を応用することにより次の世代の新しい計測手段が開拓されよう。

文 献

- 1) 保立和夫: センシング技術への光ファイバの応用. 光学, **12** (1983) 340.
- 2) 今井正明, 大塚喜弘: 光ファイバ干渉計測 (光波干渉応用技術 6). 光学, **13** (1984) 153.
- 3) 松村宏善, 芳野俊彦, 藤井義正, 上羽行行: 光ファイバセンサー実験技術 (技術ノート). 応用物理, **52** (1983) 1021.
- 4) T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh and T. Ose: Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications. IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 1624.
- 5) B. S. Kawasaki, K. O. Hill and R. G. Lamont: Biconical-taper single-mode fiber coupler. Opt. Lett., **6** (1981) 327.
- 6) M. Kawachi, B. S. Kawasaki and K. O. Hill: Fabrication of single-polarization single-mode-fiber couplers. Electron. Lett., **18** (1982) 962.
- 7) M. Kawachi: Fabrication of polarization-maintaining (3 \times 3) single-mode-fiber couplers. Electron. Lett., **19** (1983) 781.
- 8) C. M. Ragdale, D. N. Payne, F. DeFornel and R. J. Mears: Single-mode fused biconical taper fiber couplers. Proc. 1st OFS (IEE, London, 1983) p. 75.
- 9) T. Bricheno and A. Fielding: Stable low-loss single-mode couplers. Electron. Lett., **20** (1984) 230.
- 10) J. Bures, S. Lacroix, C. Veilleux and J. Lapierre: Some particular properties of monomode fused fiber couplers. Appl. Opt., **23** (1984) 968.
- 11) R. A. Bergh, G. Kotler and H. J. Shaw: Single-mode fiber optic directional coupler. Electron. Lett., **16** (1980) 260.
- 12) M. J. F. Digonnet and H. J. Shaw: Analysis of a tunable single mode optical fiber coupler. IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 746.
- 13) O. Parriaux, S. Gidon and A. A. Kuznetsov: Distributed coupling on polished single-mode optical fibers. Appl. Opt., **20** (1981) 2420.
- 14) H. Uetsuka, Y. Fujii and Y. Mitsuhashi: Tunable directional coupler using single polarization fiber. Tech. Digest of 4th IOOC, 29 A 5-2, Tokyo, Japan (1983).
- 15) B. K. Nayar and D. R. Smith: Monomode-polarization-maintaining fiber directional couplers. Opt. Lett., **8** (1983) 543.
- 16) S. K. Sheem and T. G. Giallorenzi: Single-mode fiber-optical power divider; encapsulated etching technique. Opt. Lett., **4** (1979) 29.
- 17) F. J. Liao and J. T. Boyd: Single-mode fiber coupler. Appl. Opt., **20** (1981) 2731.
- 18) D. C. Tran, K. P. Koo and S. K. Sheem: Single-mode fiber directional couplers fabricated by twist-etching techniques (stabilization). IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 988.
- 19) K. P. Koo and D. C. Tran: Glass-gel-coated single-mode-fiber coupler with programmable power splitting ratio. Electron. Lett., **18** (1982) 941.
- 20) C. A. Villarruel and R. P. Moeller: Fused single mode fiber access couplers. Electron. Lett., **17** (1981) 243.
- 21) C. A. Villarruel, M. Abebe and W. K. Burns: Polarization preserving single-mode-fiber coupler. Electron. Lett., **19** (1983) 17.
- 22) G. Schöner, E. Klement, G. Schiffner and N. Douklias: Noble method for making single-mode optical fiber directional couplers. Electron. Lett., **18** (1982) 566.
- 23) R. B. Dyott and J. Bello: Polarization-holding directional coupler made from elliptically cored fiber having a D section. Electron. Lett., **19** (1983) 601.
- 24) W. Pleibel, R. H. Stolen and S. C. Rashleigh: Polarization-preserving coupler with self aligning birefringent fibers. Electron. Lett., **19** (1983) 825.
- 25) C. A. Villarruel, M. Abebe and W. K. Burns: Birefringence correction for single-mode fiber couplers. Opt. Lett., **7** (1982) 626.
- あるいは, 辻井正秀, 今井正明, 大塚喜弘: 単一モードファイバカップラーの偏光特性と位相変調実験. 第30回応物関連講演会, 7a-X-2 (1983).
- 26) W. Eickhoff: In-line fiber-optic polarizer. Electron. Lett., **16** (1980) 762.
- 27) R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: Single-mode fiber-optic polarizer. Opt. Lett., **5** (1980) 479.
- 28) T. Hosaka, K. Okamoto and J. Noda: Single-mode fiber-type polarizer. IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 1569.
- 29) T. Hosaka, K. Okamoto and T. Eda: Fabrication of single-mode fiber-type polarizer. Opt. Lett., **8** (1983) 124.
- 30) S. Kawakami: Light propagation along periodic metal-dielectric layers. Appl. Opt., **22** (1983) 2426.
- 31) S. Kawakami and K. Shiraishi: Components for fiber-type isolator. Tech. Digest of 4th IOOC, Tokyo, Japan (1983) p. 346.
- 32) T. Okoshi: Single-polarization single-mode optical fibers. IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 879.

- 33) M. P. Varnham, D. N. Payne, R. D. Birch and E. J. Tarbox: Single-polarization operation of highly birefringent bow-tie optical fibers. *Electron. Lett.*, **19** (1983) 246.
- 34) J. R. Shimpson, R. H. Stolen, F. M. Sears, W. Pleibel, J. B. MacChesney and R. E. Howard: A single-polarization fiber. *J. Lightwave Technol.*, **LT-1** (1983) 370.
- 35) M. P. Varnham, D. N. Payne, R. D. Birch and E. J. Tarbox: Bend behavior of polarizing optical fibers. *Electron. Lett.*, **19** (1983) 679.
- 36) F. DeFornel, M. P. Varnham and D. N. Payne: Finite cladding effects in highly birefringent fiber taper-polarizer. *Electron. Lett.*, **20** (1984) 398.
- 37) M. P. Varnham, D. N. Payne, A. J. Barlow and E. J. Tarbox: Coiled-birefringent-fiber polarizers. *Opt. Lett.*, **9** (1984) 306.
- 38) A. M. Smith: Polarization and magneto-optic properties of single-mode optical fiber. *Appl. Opt.*, **17** (1978) 52.
- 39) A. M. Smith: Faraday effect in single-mode optical fiber using an injection laser light source. *Electron. Lett.*, **16** (1980) 206.
- 40) R. H. Stolen and E. H. Turner: Faraday rotation in highly birefringent optical fibers. *Appl. Opt.*, **19** (1980) 842.
- 41) E. H. Turner and R. H. Stolen: Fiber Faraday circulator or isolator. *Opt. Lett.*, **6** (1981) 322.
- 42) T. Findakly: Single-mode fiber isolator in toroidal configuration. *Appl. Opt.*, **20** (1981) 3989.
- 43) G. W. Day, D. N. Payne, A. J. Barlow and J. J. Ramskov Hansen: Faraday rotation in coiled, mono-mode optical fibers: isolators, filters, and magnetic sensors. *Opt. Lett.*, **7** (1982) 238; Design and performance of tuned fiber coil isolators. *J. Lightwave Technol.*, **LT-2** (1984) 56.
- 44) K. Shiraishi, S. Sugaya and S. Kawakami: Fiber Faraday rotator. *Appl. Opt.*, **23** (1984) 1103.
- 45) 波平宜敬, 工藤正昭, 虫明康人: 光ファイバの伝送特性に及ぼす機械的圧力の影響. *電子通信学会論文誌*, **J60-C** (1977) 391.
- 46) M. Johnson: In-line fiber-optical polarization transformer. *Appl. Opt.*, **18** (1979) 1288.
- 47) R. Ulrich and A. Simon: Polarization optics of twisted single-mode fibers. *Appl. Opt.*, **18** (1979) 2241.
- 48) R. Ulrich and M. Johnson: Single-mode fiber-optical polarization rotator. *Appl. Opt.*, **18** (1979) 1857.
- 49) A. M. Smith: Birefringence induced by bends and twists in single-mode fibers. *Appl. Opt.*, **19** (1980) 2606.
- 50) R. Ulrich, S. C. Rashleigh and W. Eickhoff: Bending-induced birefringence in single-mode fibers. *Opt. Lett.*, **5** (1980) 273.
- 51) S. C. Rashleigh and R. Ulrich: High birefringence in tension-coiled single-mode fibers. *Opt. Lett.*, **5** (1980) 354.
- 52) H. C. Lefevre: Single-mode fiber fractional wave devices and polarization controllers. *Electron. Lett.*, **16** (1980) 778.
- 53) R. Ulrich: Polarization stabilization on single-mode fiber. *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 840.
- 54) E. Giese, K. Schätzel and E. O. Schulz-Dubois: Single-loop polarization stabilization for single-mode fiber. *Opt. Lett.*, **7** (1982) 337.
- 55) Y. Kidoh, Y. Suematsu and K. Furuya: Polarization control on output of single-mode optical fibers. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) 991.
- 56) P. Granstrand and L. Thylén: Active stabilization of polarization on a single-mode fiber. *Electron. Lett.*, **20** (1984) 365.
- 57) N. J. Frigo, A. Dandridge and A. B. Tveten: Technique for elimination of polarization fading in fiber interferometers. *Electron. Lett.*, **20** (1984) 319.
- 58) D. E. N. Davies and S. A. Kingsley: Method of phase-modulating signals in optical fibers: application to optical-telemetry systems. *Electron. Lett.*, **10** (1974) 21.
- 59) S. A. Kingsley: Optical-fiber phase modulator. *Electron. Lett.*, **11** (1975) 453.
- 60) S. A. Kingsley: Fiberdyne systems for passive or semipassive fiber-optic sensors. *Electron. Lett.*, **14** (1978) 419.
- 61) 実吉純一, 菊池喜光, 能本乙彦: 超音波技術便覧 (日刊工業, 東京, 1978) p. 368.
- 62) D. A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge and A. B. Tveten: Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber. *Appl. Opt.*, **19** (1980) 2926.
- 63) M. Imai, M. Tsujii and Y. Ohtsuka: PZT cylindrical phase shifter and modulator in a single-mode fiber interferometer. *Trans. Inst. Electr. Commun. Eng. Jpn.* **E-67** (1984) 274.
- 64) K. Nosu, H. F. Taylor, S. C. Rashleigh and J. F. Weller: Acousto-optic phase modulator for single-mode fibers. *Electron. Lett.*, **19** (1983) 605.
- 65) K. Nosu, S. C. Rashleigh, H. F. Taylor and J. F. Weller: Acousto-optic frequency shifter for single-mode fibers. *Electron. Lett.*, **19** (1983) 816.
- 66) K. P. Koo and E. F. Carome: Frequency mixing in fiber-optic interferometer systems. *Electron. Lett.*, **17** (1981) 380.
- 67) K. P. Koo and G. H. Sigel, Jr.: An electric field sensor utilizing a piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVF₂) film in a single-mode fiber interferometer. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 670.
- 68) L. J. Donalds, W. G. French, W. C. Mitchell, R. M. Swinehart and T. Wei: Electric field sensitive optical fiber using piezoelectric polymer coating. *Electron. Lett.*, **18** (1982) 327.
- 69) P. D. DeSouza and M. D. Mermelstein: Electric field detection with a piezoelectric polymer-jacketed single-mode optical fiber. *Appl. Opt.*, **21** (1982) 4214.
- 70) M. D. Mermelstein: Optical-fiber copolymer-film electric-field sensor. *Appl. Opt.*, **22** (1983) 1006.
- 71) J. Jarzynski: Frequency response of a single-mode optical fiber phase modulator utilizing a piezoelectric plastic jacket. *J. Appl. Phys.*, **55** (1984) 3243.
- 72) L. Jeunhomme and J. P. Pocholle: Mode coupling in a multimode optical fiber with microbends. *Appl. Opt.*, **14** (1975) 2400.
- 73) N. Lagakos, W. J. Trott, T. R. Hickman, J. H. Cole and J. A. Bucaro: Microbend fiber-optic sensor as extended hydrophone. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 1633.
- 74) R. E. Epworth: The phenomenon of modal noise in

- analogue and digital optical fiber systems. *Proc. 4th ECOC*, Genova, Italy (1978) p. 492.
- 75) B. Hillerich and E. Weidel: Polarization noise in single mode fibers and its reduction by depolarizers. *Opt. Quantum Electron.*, **15** (1983) 281.
- 76) R. E. Epworth and M. J. Pettitt: Polarization modal noise and fiber birefringence in single mode fiber systems. *Tech. Digest of 3rd IOOC*, San Francisco, U.S.A. (1981) p. 58.
- 77) S. K. Sheem and T. G. Giallorenzi: Polarization effects on single-mode optical fiber sensors. *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 914.
- 78) R. Hughes and R. Priest: Thermally induced optical phase effects in fiber optic sensors. *Appl. Opt.*, **19** (1980) 1477.
- 79) D. W. Stowe, D. R. Moore and R. G. Priest: Polarization fading in fiber interferometric sensors. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 1644.
- 80) A. Dandridge and A. B. Tveten: Phase compensation in interferometric fiber-optic sensors. *Opt. Lett.*, **7** (1982) 279.
- 81) A. Dandridge and A. B. Tveten: Thermal phase compensation in fiber-optic interferometers. *J. Lightwave Technol.*, **LT-2** (1984) 73.
- 82) A. D. Kersey, D. A. Jackson and M. Korke: Passive compensation scheme suitable for use in the single-mode fiber interferometer. *Electron. Lett.*, **18**, (1982) 392.
- 83) S. K. Sheem, T. G. Giallorenzi and K. Koo: Optical techniques to solve the signal fading problem in fiber interferometers. *Appl. Opt.*, **21** (1982) 689.
- 84) T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Sigel, Jr., J. H. Cole, S. C. Rashleigh and R. G. Priest: Optical fiber sensor technology. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 626.
- 85) J. H. Cole, B. A. Danver and J. A. Bucaro: Synthetic heterodyne interferometric demodulation. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 694.
- 86) A. Dandridge, A. B. Tveten and T. G. Giallorenzi: Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 1647.
- 87) D. W. Stowe and T-Y. Hsu: Demodulation of interferometric sensors using a fiber-optic passive quadrature demodulator. *J. Lightwave Technol.*, **LT-1** (1983) 519.
- 88) R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: All-single-mode fiber-optic gyroscope with long-term stability. *Opt. Lett.*, **6** (1981) 502; H. C. Lefevre, R. A. Bergh and H. J. Shaw: All-fiber gyroscope with inertial-navigation short-term sensitivity. *Opt. Lett.*, **7** (1982) 454.