

解説

ヘテロダイン干渉光学系の集積化

春名 正光・西原 浩

大阪大学工学部電子工学科 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1988年1月25日受理)

Optical Integration of the Heterodyne Interferometry

Masamitsu HARUNA and Hiroshi NISHIHARA

Department of Electronics, Faculty of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamada-Oka, Suita 565

1. ま え が き

ヘテロダイン干渉計は高精度の位置・変位および速度計測において重要な光学系として知られており¹⁾, ファイバージャイロやファイバレーザードップラー速度計(ファイバ LDV)を初めとする光ファイバセンサーに利用されている。通常, これらのヘテロダイン干渉光学系は, 光学ベンチ上に必要な光学部品を配置して構成されており, 部品間の微妙なアライメントが必要である。これに対して, 薄膜導波技術を用いて干渉光学系を一つの基板上に集積化できれば, 光学的アライメントが不要で, システム全体をより小型・安定化することが期待できる。

われわれは, 過去10年余り光 IC の研究に携わっており, この間ニオブ酸リチウム (LiNbO₃: LN) やガラスなどの誘電体材料を基板とする導波要素子について実験的・理論的に検討してきた²⁾。最近, サブミクロンの精度を要求される光 IC 用パターンニング装置が整備され, いくつかの導波要素子を一体集積化してある機能を果たす光 IC が試作できるようになってきた。このような光 IC 技術を利用して, 現在上記の計測用ヘテロダイン干渉光学系の集積化に取り組んでいる。

本稿では, 速度計測を目的としたヘテロダイン干渉光学系の集積化に関する研究の現状と課題について述べる。まず, 具体的な干渉光学系を対象として光集積化の要点を示す。次に, これまで試作した光 IC の構成, 作製, 特性について述べる。これらの光 IC では, 光源として可視光ガスレーザーを用いているが, 実用段階では

これを半導体レーザー (LD) に置き換える必要がある。このハイブリッド集積化のポイントについても触れる。

2. 光集積化の要点

2.1 バルク干渉光学系

ヘテロダイン干渉光学系の代表例として, まず図1に示すようなファイバ LDV^{3,4)}を取り上げる。この光学系では, ドップラーシフト f_s を受けた信号光のピックアップに偏波保存ファイバが用いられ, ファイバと移動物体間に $1/4$ 波長板が挿入されている。したがって, 干渉光学系には, 偏光ビームスプリッターと $1/2$ 波長板が必要である。また, 被測定物の移動方向を識別するために, ブラッグセルを用いて参照光に適当な周波数シフト f_R が与えられる。この参照光と信号光をヘテロダイン検波すると, ドップラービート周波数 ($f_R \pm f_s$) が観測され, 移動物体の方向と同時にその速度が計測できる。以下に, この干渉光学系を対象として, その光集積化の要点を述べる。

2.2 導波路材料の選択²⁾

干渉光学系には, 周波数シフターのような機能光学素子が含まれているので, 導波路材料としては LN 単結晶が最適である。この LN は Ti の選択熱拡散によって容易に低損失の単一モード導波路が作製できる, また Ti 拡散によって結晶自体の電気光学・音響光学効果が損われないという特長も持っている。したがって, 光 IC の分野では最も良く利用されており, 多種多様な LN 導波要素子が提案・検討されている。しかし, 可視光および近赤外光の領域では, 光損傷が顕著であり, これに伴っ

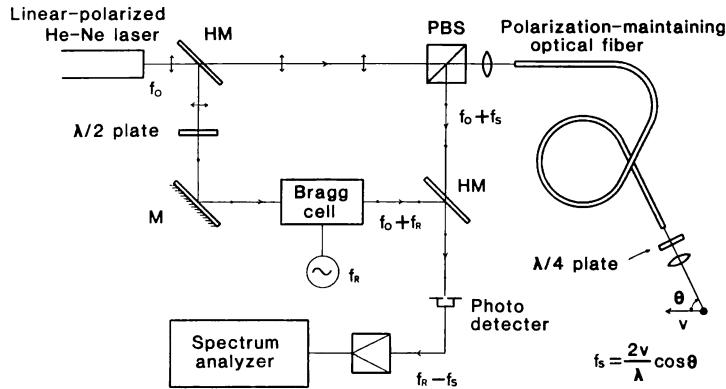


図1 バルク光学部品によるファイバーレーザードップラー速度計 (ファイバー LDV) の構成例

て光スイッチの出力光強度がドリフトする (直流ドリフト) といった問題点がある。これは導波光として異常光線を利用した場合であり、したがって、結晶の光学軸を光の伝播軸に一致させたZ軸伝播LNを用いれば光損傷の問題を避けることができる⁵⁾。以下で述べる光 IC の基板は、すべてこのZ軸伝播LNであるが、この場合には小さな電気光学定数 r_{22} (r_{33} の約1/8) を介して光変調/スイッチングを行なうことになる。そのため、機能素子の電極が長くなるのはやむをえない。

2.3 導波形干渉計

マッハ・ツェンダー干渉計は、基本的には分波・合波用の二つのハーフミラーを含む構成となっている。このハーフミラーは Ti 拡散単一モード導波路からなる Y 分岐導波路または 3-dB カップラー (完全結合長の半分の相互作用長をもつ方向性結合器) で置き換えることができる。

図2に、Y分岐導波路を要素とした導波形干渉計の構成を示す。(a)は光強度変調器として用いられる透過形干渉計であり、これに光ファイバーを接続することはできない。(b)では、一方の出力導波路端面に金属膜ミラーを付け、他方に光ファイバープローブを接続して、速度計測が行なえる。しかし、この構成ではパワー分配・合波用のY分岐導波路が共通であり、信号光と参照光のアームが完全に分離していない。これに対して、(c)は図1のヘテロダイン干渉計の光路を忠実に単一モード導波路で置き換えたものであり、3.章で述べる光集積ファイバー LDV ではこの導波形干渉計を利用している。

2.4 各光学部品と導波形素子の対応

バルク干渉計に必要な光学部品と同等の機能をもつ LN 導波形素子を選び、表1にまとめてある。各素子の構造・動作原理については文献2)を参照されたい。さ

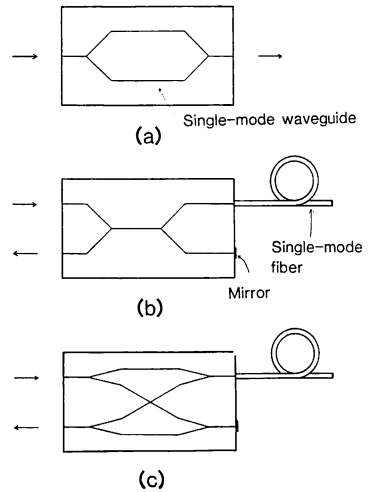


図2 導波形干渉計の構成

表1 ヘテロダイン干渉計に必要なバルク光学部品と対応するLN導波形素子

バルク光学部品	導波形素子
ハーフミラー	Y分岐導波路, 3-dBカップラー
ミラー	端面蒸着ミラー
AOブラッグセル	セラドインSSB変調器, 集積形周波数シフター
偏光子	金属クラディング
位相シフター	EO導波形位相変調器
波長板	TE/TMモード変換素子
偏光ビームスプリッター	TE/TMモードスプリッター

て、これら導波形要素では、これまで最大の電気光学定数 r_{33} を利用するために、基板には Z カット LN が用いられてきた。これに対して、2.2 項で触れたように、Z 軸伝播 LN を基板とした場合には、導波路自体の複屈折性が小さいこと、 $r_{22}(=-r_{61})$ を介して導波光が制御されることを考慮して、各導波形要素を設計する必要がある。

波長板の役割を果たすモード変換要素を例にとると、Z 軸伝播 LN では TE と TM モードがほぼ縮退しているので、くし形電極を必要とせず、直線導波路にプレーナ 3 電極を配置するだけで、高効率のモード変換が得られる^{6,7)}。一方、複屈折性が小さいので、モードスプリッターの構成はむずかしいが、これは方向性結合器の一方の導波路に金属クラディングをして約 10dB のモードスプリットング比を得ている⁸⁾。

3. 光集積ファイバー LDV⁹⁻¹²⁾

3.1 光 IC の構成

図 2 (c) の導波形干渉計に、必要な導波形要素を配置して、ファイバー LDV 用光 IC が構成できる。試作した光 IC の構成を図 3 に示す。ここで、単一モード導波路幅は $3.5\mu\text{m}$ 、周波数シフターとしては、鋸歯状波電圧を印加するタイプのセラロダイナミク SSB 変調器を用い、その電極長は 10mm、半波長電圧 14V で、 $f_R < 500\text{kHz}$ での不要サイドバンド抑圧比は 30dB である。モード変換要素には SiO_2 パッファ層を介して、長さ 10mm のプレーナ 3 電極が装荷されており、位相整合電圧 $V_C = 23\text{V}$ 、結合係数調整電圧 $V_M = 4.8\text{V}$ のとき、98% 以上のモード変換効率を示す。モードスプリッターは導波路間隔 $4.5\mu\text{m}$ 、相互作用長 2.6mm のアルミクラッド方向性結合器である。また、Y 分岐導波路の分岐角は $1/50\text{rad}$ 、中央部の導波路交差角は $1/25\text{rad}$ である。

さて、端面から励起された TE 導波光は、最初の Y 分岐導波路で 2 等分される。上のアーム (信号光アーム) に入った光はモードスプリッターを経て光ファイバーに導かれる。ファイバーから出射して移動物体で反射しドップラーシフト f_s を受けた光は、 $1/4$ 波長板によってその偏光面が 90 度回転し、再びファイバーを通して光 IC にもどり、TM 導波光となる。この信号導波光はモードスプリッターによって出力の合波用 Y 分岐導波路に導かれる。これに対して、入力 Y 分岐点で下のアームに入った TE 導波光は、モード変換要素によって TM モードに変換され、LN 端面のアルミ蒸着ミラーで反射される。その後、セラロダイナミク SSB 変調器で周波数シ

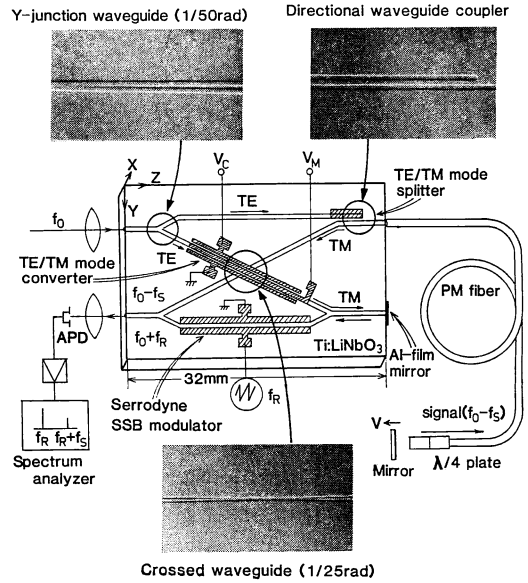


図 3 試作した光集積ファイバー LDV の構成
レーザービーム描画・作製した Ti 拡散
導波路の顕微鏡写真および実験光学系を
合わせて示してある。

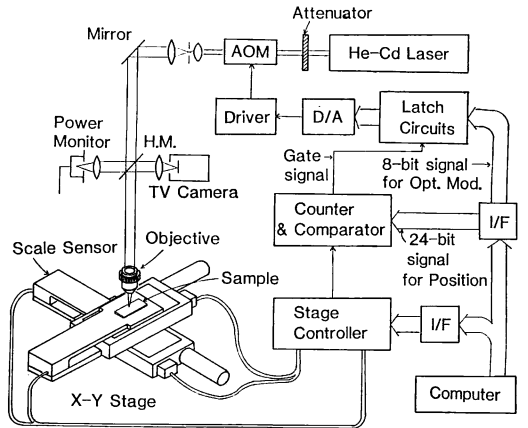


図 4 レーザービーム描画装置の構成

フト f_R を受け、参照導波光となる。出力 Y 分岐導波路でこれら信号・参照導波光を合波し、APD でヘテロダイナミク検波すると、移動物体の速度と方向を示すビート周波数スペクトル ($f_R \pm f_s$) が観測できる。

3.2 光 IC の作製

この光 IC の全長は 32mm である。このような長尺の単一モード導波路を精度良くパターンングするために、われわれは図 4 に示すようなコンピューター制御レーザービーム描画装置を開発した¹³⁻¹⁵⁾。これを用いて、フォトレジストを塗布した LN 基板上に、 $0.2\mu\text{m}$ 以下

の精度で、長さ 50 mm 以上に渡る導波路のパターニングが可能である。描画・現像後、350 Å 厚の Ti 膜をリフトオフし、熱拡散して導波路ができ上がる。Ti 拡散導波路の拡大顕微鏡写真を図 3 に合わせて示してある。光 IC の全長に渡って精度良く導波路が作製されていることがわかる。次に、導波路上にアルミプレーナー電極を配置して、前述の各導波形式子を作製する。

光学研磨した導波路端面にアルミ蒸着ミラーを設けた後、この端面に LN ブロックを装荷して、楕円クラッド偏波保存ファイバーを位置合せし、両者を UV 光硬化樹脂で接着固定した¹⁶⁾。ファイバー/導波路の結合効率は約 70% である。

3.3 速度検出特性

光源には 633 nm 直線偏光 He-Ne レーザーを用い、図 3 に示すように、移動鏡の速度計測を行なった。プローブ用ファイバー長はレーザー共振器長の整数倍にほぼ等しく 2.3 m である。セラドイン形周波数シフターには繰り返し $f_R=300$ kHz の鋸歯状波電圧を印加し、光 IC からの出力光を APD で検波し、その周波数スペクトルを観測した。図 5 は、移動鏡がファイバー先端に近付いたときの測定結果の一例であり、ドップラーシフト周波数 $f_s=25$ kHz (速射 $v\sim 8$ mm/s) である。このように、試作した光 IC を用いて、S/N 比 (信号とイメージ周波数スペクトルの振幅比) 25 dB で速度検出が行なえることを確認した。

4. 二次元速度計測用光 IC^{17,18)}

4.1 光 IC の構成と動作原理

これまで述べてきた光集積ファイバー LDV は、図 1

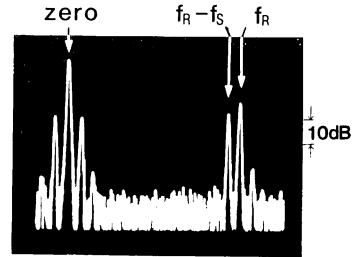


図 5 光集積ファイバー LDV の速度検出特性
ファイバー先端に移動鏡を近づけたときに得られた周波数スペクトル。参照光周波数シフト $f_R=300$ kHz, ドップラーシフト周波数 $f_s=25$ kHz ($v=8$ mm/s)。

に示したバルク干渉光学系を忠実に LN 基板上に集積化したものであり、本質的にその機能・性能は同等である。これに対して、単に素子の集積化以外に、光 IC は高速の光信号処理が可能、波長多重化が容易といった特長をもっている。これらの特長を活かせば、従来のバルク光学系あるいはマイクロオプティクスでは実現することのできない、新しい機能をもつヘテロダイン計測用光 IC が構成できる。

この第 1 段階として、図 2 (b)の導波形干渉計を基本として、周波数シフターに加えて、光スイッチを集積化した時分割二次元速度計測用光 IC を試作し、その特性評価を行なった。構成を図 6 に示す。光スイッチとしては、Z 軸伝播 LN でも 10 V 以下の印加電圧で駆動できるバランスブリッジ形スイッチを用いている。

さて、図 6 の光 IC では、二次元速度計測を行なうために、ファイバー出力光は互いに直角を成すようにして、移動物体に照射される。ただし、二つのファイバー

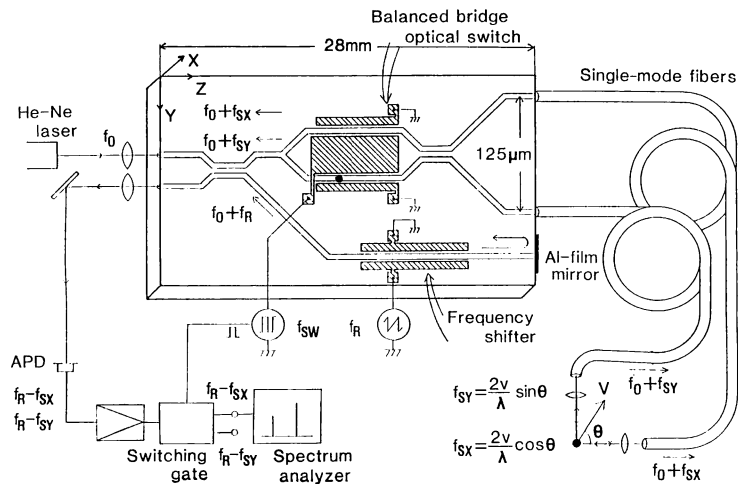


図 6 時分割二次元速度計測用光 IC の構成

出力光が任意の角度で交差しても二次元速度計測は可能である。入力導波光 (f_0) は、まず 3-dB カップラーで等分配される。上のアームに入った光はバランスブリッジ形スイッチでその光路が時分割に振り分けられ、ファイバーを通して移動物体上に集光される。物体の速度 $v_x(v_y)$ に対応するドップラーシフト $f_{sx}(f_{sy})$ を受けた反射光は再び光スイッチを経て、入力部の 3-dB カップラーにもどり、ここで下のアームからの参照導波光 ($f_0 + f_R$) と合波する。このとき、APD からの出力光には、 $(f_R \pm f_{sx})$ と $(f_R \pm f_{sy})$ からなるビート周波数が時分割多重化されている。そこで、APD の後段にスイッチングゲートを置き、これを光スイッチに印加する矩形波状電圧の繰り返し周波数 f_{sw} に同期して開閉すれば、 x 方向 (または y 方向) のみの速度信号成分を分離して取り出すことができる。

このとき、スペクトルアナライザー上でのビート周波数測定範囲内 ($f_R/2 < f_s < 3f_R/2$) に不要の周波数成分が入り込まないようにするには、スイッチング周波数 $f_{sw} > 3f_R$ の条件が必要である。また、 f_{sw} の上限はファイバー中における信号遅延時間 τ によって制限される。しかし、 τ がちょうど $1/f_{sw}$ の整数倍となるようにすれば、上限は光スイッチ自体の応答速度で決まり、1 GHz 以上の高速動作も可能である。

4.2 光 IC の作製・特性評価

3.2 項と同様の工程で光 IC を作製した。導波路幅は $3\mu\text{m}$ である。バランスブリッジ形光スイッチの電極長

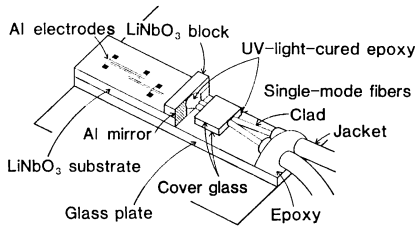
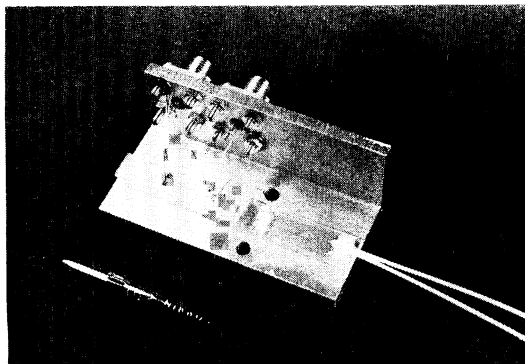


図 7 試作した光 IC

は 10mm、半波長電圧 8.4V、消光比 20dB 以上を得ている。また、周波数シフターの電極長は 12mm であるが、反射形であるので半波長電圧は 7.5V である。光スイッチの出力導波路には 2 本のコア径 $6\mu\text{m}$ の単一モードファイバーが接続されている。その間隔はファイバーのクラッド径に等しく、 $125\mu\text{m}$ である。UV 光硬化樹脂で接着・固定した後のファイバー/導波路の結合効率率は約 50%、ファイバー長 2.3m である。試作した光 IC を図 7 に示す。

実験では、コーナミラーを移動ステージ上に置き、その速度検出を行なった。このとき、参照光の周波数シフト $f_R=300\text{kHz}$ 、光スイッチには繰り返し $f_{sw}=1.5\text{MHz}$ の矩形波状電圧を印加した。結果を図 8 に示す。(a)が APD 後段のスイッチングゲートを作動しない場合であり、(b)は光スイッチに同期してゲートを開閉した場合である。ここで、ドップラー周波数シフト $f_{sx}=28\text{kHz}$ ($v_x=9\text{mm/s}$)、 $f_{sy}=79\text{kHz}$ ($v_y=25\text{mm/s}$) である。このように、光 IC を用いて S/N 比 20dB 以上で移動物体の 2 次元速度を時分割に検出することができる。

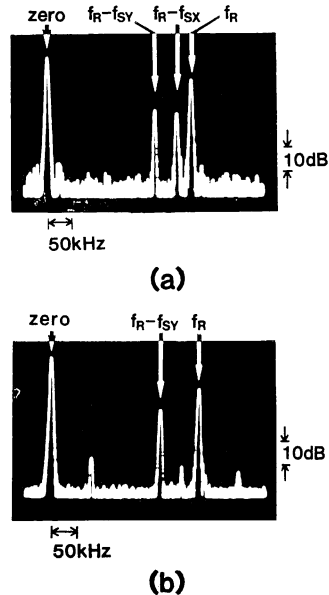


図 8 2次元速度検出特性 (a)時分割多重化されたドップラーシフト周波数スペクトル、(b)光スイッチに同期してゲートを作動したときに得られる y 方向速度成分に対応する信号スペクトル。 $f_R=300\text{kHz}$ 、 $f_{sw}=1.5\text{MHz}$ 、 $f_{sx}=28\text{kHz}$ ($v_x=9\text{mm/s}$)、 $f_{sy}=79\text{kHz}$ ($v_y=25\text{mm/s}$)。

5. 二周波直交偏光干渉光学系の集積化^{14,19-21)}

5.1 バルク干渉光学系

上記の光集積 LDV の結果に基づいて、二周波直交偏光干渉光学系^{22,23)}の集積化について検討した。この光学系の一例を図9に示す。光源には He-Ne ゼーマンレーザーを用い、周波数が f_1, f_2 と異なりかつ互いに直交する二つの直線偏光波を発生する。このヘテロダイン干渉計からは (f_1-f_2) なる参照ビート周波数と、 $(f_1-f_2 \pm f_s)$ なる信号ビート周波数が取り出される。この両者の周波数差をカウントして、被測定物の位置・変位計測が行なえる。さらに、二つのビート周波数の位相差を検出することによって、1nm オーダーの高精度の位置計測が可能となる²⁴⁾。

5.2 光集積化の試み

このバルク光学系に対応する光 IC の構成を図10に示す。この光 IC のポイントは、直線偏光のレーザーを光源として使用できることにある。すなわち、中央導波路の入力部にモード変換素子 MC とセラドイン形周波数シフター FS からなる二周波直交偏光発生デバイスが内蔵されている。まず、モード変換素子の印加電圧を調整して $\kappa L = \pi/4$ (κ はモード結合係数、 L は電極長) となるようにすると、入力された TE 光 (f_0) のパワーが TE と TM モードに等分配される。周波数シフターでは、結晶の Y 軸方向に繰り返し f_R の鋸歯状波電圧が印加されているので、これら TE と TM モードは r_{22} を介して等量・逆符号の位相変化を受ける。したがって、FS の出力部では、等振幅でかつ周波数が異なる TE ($f_1=f_0-f_R$) と TM モード ($f_2=f_0+f_R$) が発生する。

この後、方向性結合器 C_1 によって、TE と TM モー

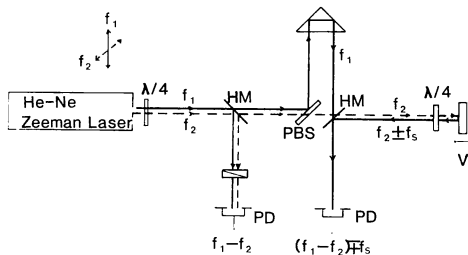


図9 二周波直交偏光干渉光学系

ドのパワーの一部を上への導波路に導き、再び $\kappa L = \pi/4$ なるモード変換素子 MC と金属クラッド偏光子を通して、参照ビート周波数 $(f_1-f_2=2f_R)$ を得る。方向性結合器 C_1 を通過した残りの光波は、モードスプリッター MS によって、TM モードは偏波保存ファイバーに入り、移動物体によってドップラーシフト f_s を受け、偏光が90度回転して光 IC にもどる。TE モードは端面のアルミ蒸着ミラーで反射し、3-dB カップラー C_2 でドップラーシフト信号光と合波する。そして、下の導波路から信号ビート周波数 $(f_1-f_2 \pm f_s)$ が検出される。

この光 IC には、モードスプリッター、3-dB カップラーを含めて、計5個の方向性結合器が含まれており、また全長が45mmである。光 IC の作製にあたっては、まずレーザービーム描画による方向性結合器の作製精度を慎重に評価し²⁵⁾、この上で導波路パターンニングを行なった。

実験では、やはり 633nm He-Ne レーザーを光源とし、周波数シフターには $f_R=100$ kHz の鋸歯状電圧を印加して、移動鏡の速度検出を行なった。得られた参照および信号ビート周波数スペクトルを図11に示す。ファイバー LDV 用光 IC に比べてかなり複雑な構成であ

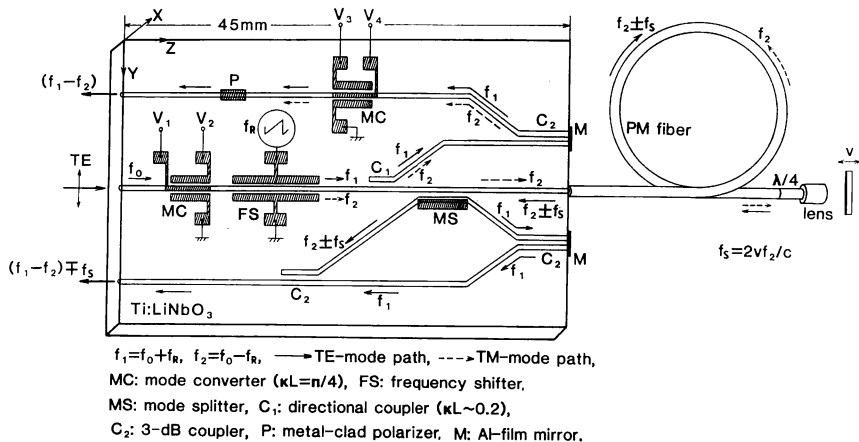


図10 二周波直交偏光発生デバイスを含むヘテロダイン干渉用光 IC の構成

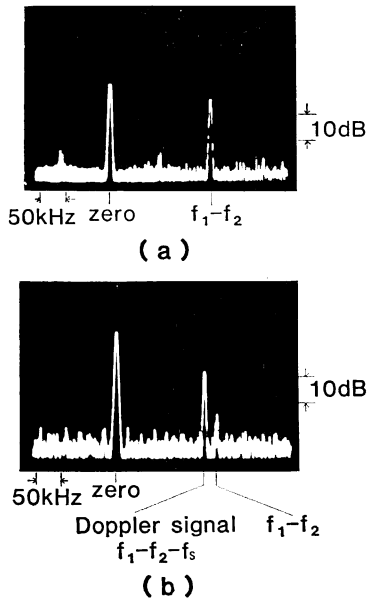


図 11 速度検出特性

(a) 参照ビート周波数スペクトル, (b) 信号ビート周波数スペクトル. $f_1-f_2=2f_R=200$ kHz, $v=7$ mm/s.

るにもかかわらず、参照ビート周波数においては不要サイドバンド抑圧比 22 dB、そして S/N 比 20 dB 以上で信号ビート周波数を検出することができた。

6. ハイブリッド集積化について

速度計測用ヘテロダイナミク干涉計を中心として、その集積化に関する研究の現状について述べてきた。干涉計自体は Z 軸伝播 LN に集積化し、安定に速度計測を行なえる見通しを得ている。しかし、光源として He-Ne ガスレーザーを用いているので、まだ光学ベンチを離れて特性評価を行なうことはできない。

そこで、光源に LD を用いた場合について考えてみよう。問題は LD のコヒーレント長がガスレーザーに比べて極端に短いことである。本稿で述べた偏波保存ファイバー付光 IC では、信号光アームと参照アームの光路差がいずれも 4 m を越えるので、光源をそのまま LD に置き換えることはできない。しかし、参照光アームの導波路端面のアルミ蒸着ミラーを取り除き、この部分にプローブ用ファイバーと同じ長さのファイバーを接続し、その先端に蒸着ミラーを設ければ、この問題は解決できる。この場合には、2 本のファイバー長を調整して、信号光と参照光アームの光路差をほぼ等しくすることができるので、ことさらに DFB レーザーを使用する必要は

ない。

われわれは現在 0.8 μm 帯 LD を光源とした光集積ファイバー LDV について検討している。光 IC の一方の端面には、プローブ用と参照光アーム用の 2 本の偏波保存ファイバーが接続されており、さらに他端にも LD → 光 IC および光 IC → APD 接続用のファイバーが接着している。動作波長が異なるため、導波路幅を始め各導波路素子の見直しが必要であるが、これまでに LD を光源とした場合にも、S/N 比 20 dB 以上で速度検出ができることを確認している。

さらに、LD および APD と光ファイバーの接続、プローブ用ファイバー先端の小型化など、周辺技術を検討すれば、光学ベンチを離れて動作する速度計測用ハイブリッド光 IC も実現できる感触を得ている。

7. ま と め

以上、ヘテロダイナミク干涉光学系の集積化について、ここ数年の間に得られた実験結果を中心にまとめてみた。ドップラーシフト周波数を検出するヘテロダイナミク光学系は、本来周囲の温度変化、光源の発振波長変動に強い光学系であり、それだけ光集積化も容易であるといえる。これに対して、光 IC を用いて、いかに安定に位相差検出を行ない、高精度の変位・位置計測を達成するかは今後の課題といえる。この点、Z 軸伝播 LN 導波路は TE, TM モードがほぼ縮退しているので、周囲温度の変化に安定であるという特長がある。これについては、とくに 5. 章で述べた二周波直交偏光干涉光学系を中心に検討していく予定である。このほか、素子集積度の向上、4. 章の 2 次元速度計測用光 IC の項で述べたように、光 IC の高速性、機能性といった特長を活かした、新しい構成の計測用光 IC 等について検討する必要がある。

なお、本稿では、各導波路素子および光 IC 作製技術などの詳細は割愛した。これについては関連文献を参照されたい。

文 献

- 1) たとえば、松本弘一：“変位・距離・速度計測用干涉計”，光学, 13 (1984) 511-519.
- 2) 西原 浩, 春名正光, 西原敏明：光集積回路 (オーム社, 東京, 1985).
- 3) H. Nishihara, J. Koyama, N. Hoki, F. Kajiya, M. Hironaga and M. Kano: Optical-fiber laser Doppler velocimeter for high-resolution measurement of pulsatile blood flows,” Appl. Opt., 21 (1982) 1785-1790.
- 4) H. Nishihara, K. Matsumoto and J. Koyama: “Use of a laser diode and an optical fiber for a compact

- laser-Doppler velocimeter," *Opt. Lett.*, **9** (1984) 62-64.
- 5) R.L. Holmann, J.R. Bush, C.M. Verber, V.E. Wood, N.F. Hartman and P.J. Cressman: "Z-axis propagation and the avoidance of optical damage in lithium niobate waveguides," *Topical Meeting on Integrated and Guided-Wave Optics, Florida* (1984) Paper WC 2.
 - 6) M. Haruna, I. Shimada and H. Nishihara: "An efficient TE-TM mode conversion using a z-propagation LiNbO₃ waveguide," *Trans. IECE Jpn.*, **E 69** (1986) 418-419.
 - 7) M. Haruna, J. Shimada and H. Nishihara: "Optical wavelength-independent and damage-free polarization controller in LiNbO₃ waveguides," *1st Optoelectronics Conference, Tokyo* (1986) Paper A2-4.
 - 8) 戸田裕之, 春名正光, 西原 浩: "金属クラッド光方向性結合器形 TE-TM モードスプリッタ", 昭62電子情報通信学会総合全国大会(1987)講演 954.
 - 9) H. Toda, M. Haruna and H. Nishihara: "Integrated-optic fiber laser Doppler velocimeter: Proposal and first demonstration," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, Tokyo* (1986) Paper 4.7.
 - 10) 春名正光, 西原 浩: "光集積ファイバレーザードップラー速度計", *光学*, **16** (1987) 60-61.
 - 11) H. Toda, M. Haruna and H. Nishihara: "Optical integrated circuit for a fiber laser Doppler velocimeter," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 901-905.
 - 12) 戸田裕之, 春名正光, 西原 浩: "ファイバレーザードップラー速度計の光集積化", *電子情報通信学会論文誌*, **J 70-C** (1987) 1415-1422.
 - 13) M. Haruna, S. Yoshida and H. Nishihara: "Laser-beam lithographic system for integrated optics," *1st Optoelectronics Conf., Tokyo* (1986) Paper A3-5.
 - 14) M. Haruna and H. Nishihara: "Laser-beam lithography for large-area optical integrated circuits," *Int. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Commuun., Reno, Nevada* (1987) Paper TuH6.
 - 15) M. Haruna, S. Yoshida, H. Toda and H. Nishihara: "Laser-beam writing system for optical integrated circuits," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 4587-4592.
 - 16) K.H. Cameron: "Simple and practical technique for attaching single-mode fibers to lithium niobate waveguides," *Electron. Lett.*, **20** (1984) 974-976.
 - 17) 笠澄研一, 戸田裕之, 春名正光, 西原 浩: "2次元速度計測用光 IC", *電子情報通信学会研究会資料*, **OQE 87-121** (1987).
 - 18) M. Haruna and H. Nishihara: "Active integrated optics for sensors," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, New Orleans* (1988) Paper ThDD 2.
 - 19) 水内公典, 戸田裕之, 春名正光, 西原 浩: "二周波直交偏光干渉光学系の集積化", *電子情報通信学会研究会資料*, **OQE 86-146** (1987).
 - 20) 水内公典, 戸田裕之, 春名正光, 西原 浩: "二周波直交偏光干渉用光 IC の試作", 昭62電子情報通信学会総合全国大会(1987)講演 965.
 - 21) 戸田裕之, 春名正光, 西原 浩: "偏波保存ファイバ付ヘテロダイン計測光学系の集積化", *応用物理学会・光ファイバセンサ研究会資料*, **WOFS 5-3** (1987).
 - 22) 芳野俊彦: "光ヘテロダイン", *計測技術*, **11** (1983) 35-42.
 - 23) 高崎 宏: "二周波直交偏光干渉法", *光学*, **13** (1984) 421-428.
 - 24) 吉田宣昭, 久保田敏弘, 芳野俊彦: "光ファイバヘテロダイン干渉計による微小変位の遠隔測定", 昭60春応用物理学関係連合講演会(1985)講演 31 a-p-9.
 - 25) M. Haruna, T. Maeda and H. Nishihara: "Laser-beam lithographed $1 \times N$ star coupler in LiNbO₃," *1st Microoptics Conf., Tokyo* (1987) Paper H 2.