OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	レーザドップラ速度計測用光集積回路デバイスに関する研究
Author(s)	戸田, 裕之
Citation	大阪大学, 1989, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2453
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

レーザドップラ速度計測用
光集積回路デバイスに関する研究

１９８９年１月

戸　田　裕　之

内 容 梗 概

本論文は，著者が大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程に在学中，西原研究室において行った“レーザドップラ速度計測用光集積回路デバイスに関する研究”をまとめたもので，８章から構成されている。以下，その各章について，内容の梗概を述べる。

第１章　序　　論

本章では，ニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）光集積回路デバイスの研究の現状と，これを光計測分野に応用した場合の問題点を述べ，本研究の目的，課題を明らかにする。

第２章　レーザドップラ速度計測光学系の集積化の提案

本章では，まず計測用ヘテロダイン干渉光学系の一つであるレーザドップラ速度計測（Laser Doppler Velocimetry：ＬＤＶ）光学系の測定原理と構成について述べる。次に，ＬＤＶ用光集積回路デバイスの導波路材料として，Ｚ軸伝搬$LiNbO_3$導波路の特性評価を行う。また，単一モード導波路によって構成される導波形干渉計の構成について検討する。これらの基本的な考察に基づいて，ＬＤＶ用光集積回路デバイスを提案する。

第３章　主要導波形素子の検討

提案した光集積回路デバイスを実現するためには，速度計測に必要なバルク光学部品を，対応する機能をもつＺ軸伝搬$LiNbO_3$導波形素子に置き換える必要がある。本章では，デバイスの主要導波形素子である周波数シフタ，ＴＥ－ＴＭモード変換素子，ＴＥ－ＴＭモードスプリッタについて，それぞれ検討した結果を述べる。

第４章　レーザドップラ速度計測用光集積回路デバイスの試作・特性測定

ＬＤＶ用光集積回路デバイスを試作し，その特性測定を行う。まず，デバイスの導波路パターニングを行うために開発したレーザビーム直接描画装置，および偏波保存ファイバと単一モード導波路の結合法について述べる。次に，試作したデバイスを用いて行った移動鏡の速度計測実験について述べる。この結果，Ｚ軸伝搬$LiNbO_3$導波路を用いて，ＬＤＶ干渉光学系を集積化できることを実証した。

第５章　0.8μm帯半導体レーザを用いたレーザドップラ速度計測用光集積回路デバイス

光源に半導体レーザ（ＬＤ）を用いると，より小型なシステムを構成できると期待される。本章では，0.8μm帯ＬＤの可干渉距離の測定結果，これをもとに構成したＬＤＶ用光集積回路デバイスの作製，および試作したデバイスの速度検出特性について述べる。

第６章　時分割２次元速度計測用光集積回路デバイス

本章では，高速光スイッチングという光集積回路の特長を活かした機能をもつデバイスとして，導波形光スイッチを集積化した時分割２次元速度計測用光集積回路デバイスについて検討する。デバイスに集積化したバランスブリッジ形光スイッチの特性，および試作したデバイスの時分割２次元速度計測特性について述べる。

第７章　光集積化技術の高精度変位計測への応用

本章では，ＬＤＶ干渉光学系の集積化技術を，高精度の変位計測に利用されている二周波直交偏光干渉光学系に応用した，変位計測用光集積回路デバイスについて検討する。まず，デバイスの主要導波形素子である二周波直交偏光発生素子について述べる。次に，試作したデバイスを用いて行った，変位計測の

ための基礎実験の結果について述べる。さらに，デバイス周囲の温度変化，光源の周波数変動，および導波路端面における反射光などの影響を理論的に検討し，本デバイスによる変位計測の測定精度を明らかにする。

第8章　結　　論

本研究で得られた成果を総括し，今後の問題点や課題を指摘する。

レーザドップラ速度計測用光集積回路デバイスに関する研究

目　　次

第1章　序　　論 …… 1

1.1　ニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）光集積回路デバイスと
その問題点 …… 1

1.2　Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路を用いた
レーザドップラ速度計測光学系の集積化と本研究の目的 …… 2

1.3　本研究の課題と研究の経緯 …… 4

1.4　論文の構成 …… 5

第2章　レーザドップラ速度計測光学系の集積化の提案 …… 7

2.1　緒　　言 …… 7

2.2　レーザドップラ速度計測（ＬＤＶ）光学系の測定原理と構成 …… 7

2.2.1　ＬＤＶの原理 …… 7

2.2.2　ＬＤＶ光学系の構成 …… 9

2.3　Z軸伝搬 Ti拡散$LiNbO_3$導波路 …… 11

2.3.1　単一モード条件と導波路の作製 …… 11

2.3.2　導波路の特性評価 …… 13

2.4　導波形干渉計の構成法 …… 15

2.5　レーザドップラ速度計測用光集積回路デバイスの提案 …… 16

2.6　結　　言 …… 18

第3章　主要導波形素子の検討 …… 20

3.1　緒　　言 …… 20

3.2 セロダイン形周波数シフタ ……20
3.2.1 構造と動作原理 ……20
3.2.2 出力光の周波数スペクトル ……22
3.3 TE－TMモード変換素子 ……24
3.3.1 構造と動作原理 ……24
3.3.2 モード変換特性 ……25
3.4 TE－TMモードスプリッタ ……26
3.4.1 構造と動作原理 ……26
3.4.2 動作の検討と設計 ……27
3.4.3 特性測定 ……30
3.5 結　言 ……32

第4章 レーザドップラ速度計測用光集積回路デバイスの
試作・特性測定 ……34
4.1 緒　言 ……34
4.2 デバイスの作製手順 ……34
4.3 レーザビーム描画による導波路パターニング ……37
4.3.1 レーザビーム描画装置 ……37
4.3.2 描画特性 ……39
4.4 偏波保存光ファイバと導波路の結合 ……41
4.4.1 端面ブロックを用いた結合法 ……41
4.4.2 結合効率の測定 ……43
4.5 速度検出特性測定 ……45
4.5.1 光学実験系 ……45
4.5.2 測定結果 ……46
4.6 結　言 ……47

第5章　0.8μm帯半導体レーザを用いた
レーザドップラ速度計測用光集積回路デバイス ……50
5.1 緒　言 ……50
5.2 光源の可干渉距離の測定 ……50
5.3 デバイスの構成 ……54
5.4 デバイスの作製 ……55
5.4.1 作製パラメータ ……55
5.4.2 偏波保存ファイバアレイと導波路の結合 ……56
5.4.3 半導体レーザ・検出器と光ファイバの一体化 ……57
5.5 速度検出特性測定 ……58
5.6 結　言 ……62

第6章　時分割2次元速度計測用光集積回路デバイス ……63
6.1 緒　言 ……63
6.2 デバイスの構成 ……63
6.3 時分割多重による2次元速度計測の原理 ……65
6.4 バランスブリッジ形光スイッチ ……68
6.4.1 構造と動作原理 ……68
6.4.2 特性測定 ……70
6.5 作製パラメータ ……71
6.6 2次元速度検出特性測定 ……72
6.6.1 光学実験系 ……72
6.6.2 測定結果 ……73
6.7 結　言 ……75

第7章　光集積化技術の高精度変位計測への応用 ……76
7.1 緒　言 ……76

7.2 バルク部品構成の変位計測用二周波直交偏光干渉光学系 ……76
7.3 変位計測用光集積回路デバイスの構成 ……78
7.4 二周波直交偏光発生素子 ……80
7.4.1 素子の構成 ……80
7.4.2 出力光の周波数スペクトル ……81
7.5 デバイスの試作とビート信号の観測 ……83
7.6 測定精度の検討 ……85
7.6.1 温度変化の影響 ……85
7.6.2 光源の周波数変動の影響 ……91
7.6.3 出射導波路端面における反射光と導波光の減偏光の影響 ……94
7.7 結　言 ……97

第8章 結　論 ……99

謝　辞 …… 102

参考文献 …… 103

関連発表論文 …… 112

第1章　序　論

1.1　ニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）光集積回路デバイスとその問題点

光通信，光情報処理をはじめとする，いわゆるオプトエレクトロニクスの発展に伴い，微小光学部品では実現できない超小型，無調整の光学デバイスとして，光集積回路[1),2)]が注目されている。光集積回路とは，一つの基板の表面に屈折率のわずかに高い部分を作って光導波路とし，これを基本にしていくつかの光素子（導波形素子）を集積化することによって，全体としてある機能をもたせるようにした光回路[3)]である。この光集積回路の概念が提唱されて以来，各種誘電体，半導体を基板とした薄膜導波路材料が検討されてきた。

現在，研究が行われている主な導波路材料には，Ⅲ－Ⅴ族半導体，Si を基板とするガラス薄膜，負の一軸性結晶のひとつであるニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）がある。この中でも，代表的な電気光学結晶として知られる$LiNbO_3$は，遷移金属であるTi を熱拡散[4)]することによって，結晶自体の電気光学効果（印加電界によって屈折率が変化する効果，光波の位相変調や偏光制御などに利用できる）を損なうことなく，容易に1dB/cm以下の低損失の単一モード導波路を作製できる[5),6)]という特長を持っており，最も活発に研究が行われている導波路材料である。

この$LiNbO_3$ 単一モード導波形素子，あるいはこれらを集積化した光集積回路デバイスの応用分野としては，光通信[7)]や光計測が検討されている。光通信の分野では，光変調素子[8),9)]や光交換用N×Nスイッチング網[10),11)]の研究が盛んに行われている。また，コヒーレント光通信の受光用デバイス[12)]が提案されている。これらのデバイスには次のような特徴がある。

（Ⅰ）光ファイバの伝搬損失が最も小さくなる波長1.3μm帯あるいは1.5μm帯を対象としている。

（Ⅱ）光制御を効率よく行う（最大の電気光学定数 r_{33} を利用する）ために，異常光線を導波モードとして用いるように結晶軸方位の選定を行ってい

る。その結果，結晶のX軸，またはY軸方向に導波光を伝搬（X軸伝搬，Y軸伝搬）させている。

（Ⅲ）光通信システムでは光波を伝送路に閉じ込めて伝送させるので全体の損失は少なく，そのために導波光パワーは小さくてよい。

これに対して，計測用光集積回路デバイスにおいては，次のような条件が要求される。

（1）測定精度，分解能の点から，光源の短波長化が望ましい。

（2）伝送路の外部に導波光を送受するなどして測定を行うため，光学系全体の損失が多くなる。そのために，光源，導波光パワーを大きくする必要がある。

しかしながら，これらの条件を満足するために，可視～近赤外領域で$LiNbO_3$の異常光線を導波モードとして用いると，光損傷[13),14)]およびこれに付随する直流ドリフト[15)]が原因となって素子自体の動作が不安定になるという問題が生じる。この問題が生じると導波光パワーが制限されるために，結果的に計測用光集積回路デバイスの測定精度が低下することになる。

これまで，基本的なマッハーツェンダーあるいはマイケルソン導波形干渉計を用いた温度[16),17)]，変位[18)]，圧力センサ[19)]，あるいは位相変調形ファイバジャイロ[20)]など，素子数の少ない計測用光集積回路デバイスの報告例はあるものの，これらはすべて基礎的研究の段階にとどまっている。ここで対象とする高精度の計測光学系を，上記のような条件を満足して集積化することについては，全く検討が行われていないのが現状である。

1.2 Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路を用いたレーザドップラ速度計測光学系の集積化と本研究の目的

さて，この光損傷の問題を解決する導波路作製法として，プロトン交換導波路[21)]が検討されているが，これは$LiNbO_3$結晶の構造自体に影響を及ぼし，バルク結晶に比べて電気光学効果が極端に低下する[22)]という欠点がある。これ

に対して，$LiNbO_3$ 結晶の光軸（Z軸）方向に導波光を伝搬させる，いわゆるZ軸伝搬$LiNbO_3$とすると，導波路中の二つの直交導波モード(TE/TMモード：その電界/磁界が導波路基板に対して平行な面内で振動している導波モード）は共に常光線となり，光損傷の影響を回避できることが最近になって報告された[23]。したがって，Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路を用いれば，可視光ガスレーザを光源とする計測用光学系の集積化も可能であると考えられる。反面，Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路では，導波光の制御に小さな電気光学定数 r_{22} を利用することになると同時に導波路の複屈折性が極めて小さくなる（バルクZ軸伝搬$LiNbO_3$ 結晶は等方性である）ので，これらに留意して個々の導波形素子を設計する必要がある。

一方，高精度の計測光学系の代表的なものにヘテロダイン干渉光学系[24]があるが，その中でもレーザドップラ速度計測（Laser Doppler Velocimetry：LDVと略す）光学系[25),26)]が最も一般的である。このLDV光学系は，光干渉に加えて，偏光，周波数，位相制御など，基本的な光学技術を含む代表的なヘテロダイン干渉光学系である。したがって，LDV光学系の集積化を行うことができれば，さらに高度なヘテロダイン干渉光学系の集積化へ発展していけると期待できる。

そこで本研究は，ヘテロダイン干渉光学系の一例としてレーザドップラ速度計測（LDV）光学系をとりあげ，Z軸伝搬$LiNbO_3$ 導波路を用いてその集積化の検討を行い，この結果をもとに計測用ヘテロダイン干渉光学系における$LiNbO_3$ 光集積回路デバイスの実現性を示唆し，またその問題点を明らかにすることを目的として行ったものである。

基本的なバルク部品構成のLDV光学系は，音響光学変調器（音響光学効果を利用した光周波数シフタ），波長板，偏光ビームスプリッタを含むマッハーツェンダー干渉計に，信号光送受用多モードファイバを接続した[27),28)]ものであり，光学系全体が，振動を避けるために定盤上に光学部品を配置して構成されている。本研究で検討を行うLDV用光集積回路デバイスは，以下に示す

ように，これら各光学部品に対応する機能を持つ導波形素子をZ軸伝搬$LiNbO_3$基板上に集積化し，信号光送受用光ファイバを接続したものとなる。

(1) 音響光学変調器 → 導波形周波数シフタ

(2) 波長板 → TE－TMモード変換素子

(3) 偏光ビームスプリッタ → TE－TMモードスプリッタ

(4) 多モード光ファイバ → 偏波保存光ファイバ

デバイスは単一モード導波路で構成され，内部で偏光制御も行うので，プローブ用光ファイバとしては，多モード光ファイバに代わって偏波保存光ファイバが用いられることになる。

1.3 本研究の課題と研究の経緯

上記のLDV光学系を集積化する上での研究課題は，

(1) 電気光学効果が小さく，かつ複屈折性の極めて小さいZ軸伝搬$LiNbO_3$導波路における周波数シフタのような位相変調素子，およびTE－TMモード変換素子やモードスプリッタのような偏光制御素子の設計法，作製法の確立，および特性測定

(2) デバイス導波路のパターニングを行うレーザビーム描画装置の開発と，単一モード導波路と偏波保存ファイバの結合法の確立

(3) デバイスの試作とその速度検出特性の測定

である。

(1) については，これまで，Z軸伝搬$LiNbO_3$導波形素子の検討はほとんど行われていないため，新たにZ軸伝搬$LiNbO_3$を基板とした主要な導波形素子について設計，検討を行い，その特性を測定した。

(2) については，光集積回路作製のキーポイントは，所望の導波路パターンを正確に基板上に得ることである。特にZ軸伝搬$LiNbO_3$デバイスでは，位相変調に電気光学定数r_{22}を用いざるを得ないために，その全長は～30mmを超える。そのため，導波路パターニングに一般的なフォトリソグラフィ技術を

用いるのは困難である。そこで，著者らはレーザビーム描画装置を開発し，これを用いてデバイスの導波路パターニングを行った。また，偏波保存ファイバと単一モード導波路の結合法の確立も，重要な研究課題の一つである。

また，これらの研究結果を踏まえて，Z軸伝搬$LiNbO_3$光集積回路デバイスの発展性，可能性を示唆することは重要である。そこで本研究では，さらに

(4) システム全体の小型・安定化を図るために，光源に半導体レーザを用いたＬＤＶ用光集積回路デバイス

(5) 高速光変調／スイッチング等の光ＩＣの特長を活かした新しい機能をもつＬＤＶ用光集積回路デバイスの提案，特性評価

(6) 高精度変位計測に用いられる二周波直交偏光干渉光学系の光集積化

の三点に主眼を置いて検討を行った。

1.4 論文の構成

図1.1に本論文の構成を示すブロックダイアグラムを示す。第2章では，まずＬＤＶ光学系の原理と構成を述べ，光集積回路化のための基本的な考察として，Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路の特性評価の結果，および導波形干渉計の構成法を述べる。これらの考察にもとづいて，ＬＤＶ用光集積回路デバイスを提案する。第3章では，デバイスの主要導波形素子であるセロダイン形周波数シフタ，ＴＥ－ＴＭモード変換素子，ＴＥ－ＴＭモードスプリッタについて検討する。第4章では，提案したＬＤＶ用光集積回路デバイスを作製する。作製のキーポイントであるレーザビーム描画による導波路パターニング，および偏波保存光ファイバと導波路の結合について述べる。さらに，作製したデバイスを用いて行った速度計測実験の結果について述べる。第5章では，光源に半導体レーザを用いたデバイスを提案し，その設計，作製，実験結果について述べる。第6章では，導波形干渉計に加えて光スイッチを集積化した時分割2次元速度計測用光集積回路デバイスについて検討する。デバイスに集積化したZ軸伝搬$LiNbO_3$バランスブリッジ形光スイッチの特性，および作製したデバイスの

2次元速度計測特性について述べる。第7章では，高精度の変位計測に利用されている二周波直交偏光干渉光学系の集積化について検討する。試作したデバイスを用いて行った基礎実験の結果，および周囲温度の変化，導波路端面での反射光などが変位計測の測定精度に与える影響を理論的に検討した結果を述べる。第8章では，本研究で得られた成果を総括して，今後の問題点や課題を指摘する。

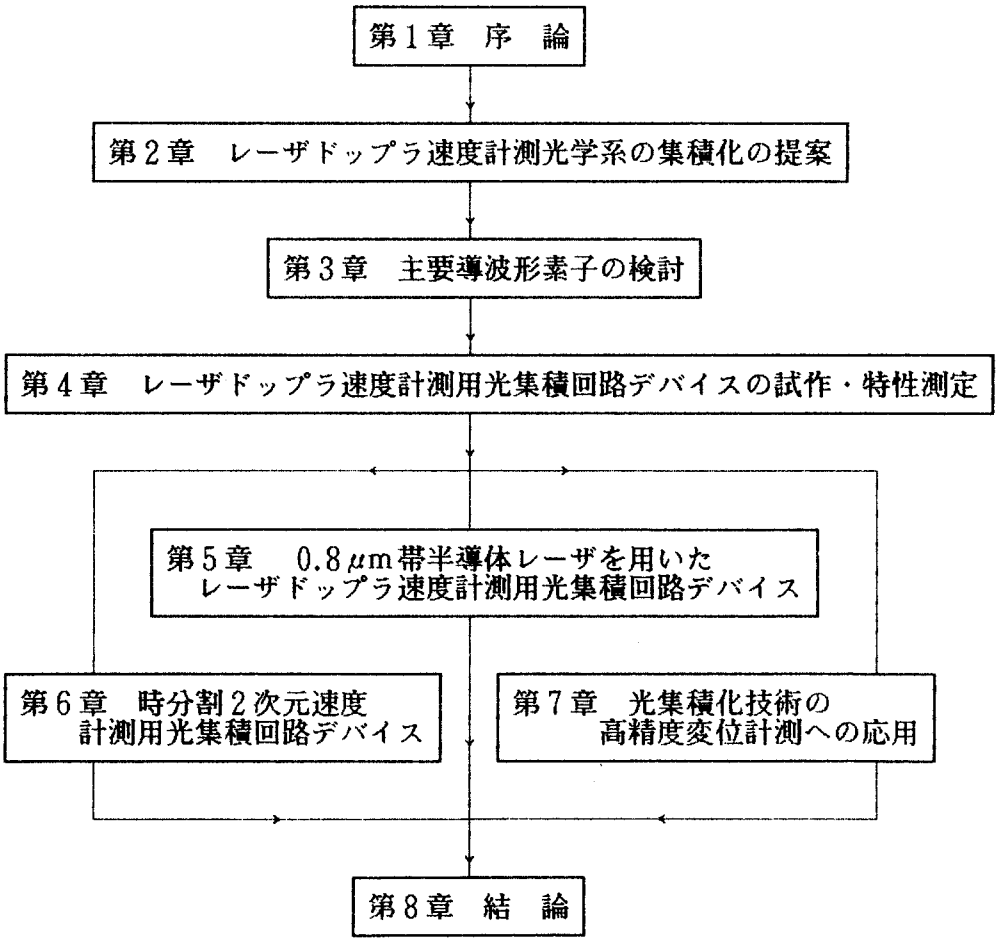


図1.1　本論文の構成を示すブロックダイアグラム

第２章　レーザドップラ速度計測光学系の集積化の提案[29)]

2.1 緒　　言

本章では，まずはじめにレーザドップラ速度計測（ＬＤＶ）光学系の測定原理，およびその代表的な構成について述べ，集積化の対象となるＬＤＶ光学系を示す。次に，Ｚ軸伝搬 Ｔｉ拡散$LiNbO_3$ 導波路の特性評価を行う。評価項目は伝搬損失，光損傷の閾値レベル，および導波光のdepolarization[30)]（導波光の偏光が一部消滅すること，本論文では以後，減偏光と呼ぶ）である。また，ヘテロダイン干渉計の一つであるＬＤＶ光学系を$LiNbO_3$ 基板上に集積化するために，導波形干渉計の構成法について検討する。これらの検討に基づいてＬＤＶ用光集積回路デバイスを提案し，デバイスに集積化する導波形素子とバルク光学部品との関係を対応づける。

2.2 レーザドップラ速度計測（ＬＤＶ）光学系の測定原理と構成[31)]

2.2.1 ＬＤＶの原理

光源と観測者が相対的に移動しているとき，観測される光周波数がその相対速度に応じてシフトすることは，ドップラ効果としてよく知られている。ＬＤＶはこの効果を利用して，移動物体にレーザ光のような単色光を照射し，物体からの散乱光の周波数シフトを検出して，その速度を計測するものである。

いま，図2.1において光源Ｓと観測者Ｑが静止し，散乱物体Ｐが速度ｖで移

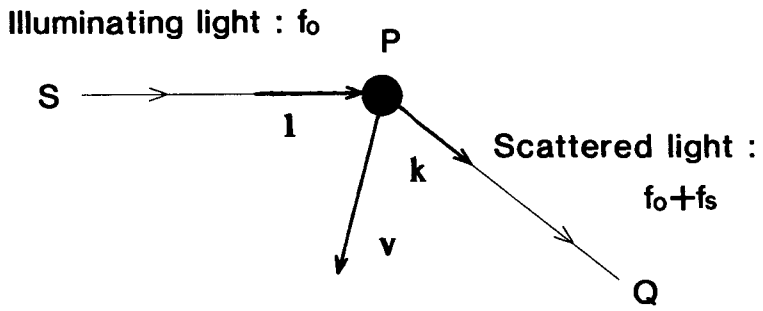


図2.1　移動物体による散乱光周波数のドップラシフト

動しているものとする。照射光の波長をλとし，光源Sからの照射光の進行方向の単位ベクトルを$\mathbf{l}$，散乱光の進行方向の単位ベクトルを$\mathbf{k}$とする。散乱光のドップラシフト周波数 f_S は，$|\mathbf{v}| \ll c$（c：光速）のとき，

$$f_S = \frac{\mathbf{v} \cdot (\mathbf{k} - \mathbf{l})}{\lambda} \tag{2.1}$$

となる。式(2.1) からわかるように，ドップラシフト周波数 f_S は照射光・散乱光・速度の方向関係により変化する。例えば，$\lambda = 0.5\,\mu m$，$|\mathbf{v}| = 1\,m/sec$ のとき，$f_S = 0 \sim 4\,MHz$ である。

このように，ドップラ効果による光周波数シフトは光の周波数（上の例では600THz)に比べて非常に小さいため，分光器で直接これを検出するのは困難である。このような僅かな光周波数シフトを簡便に，しかも精度よく検出する方法として，光ヘテロダイン検波（以後，ヘテロダイン検波と略す）が用いられる。図2.2において，角周波数ω_1の光波E_1とω_2の光波E_2をハーフミラーHMで伝搬方向を一致させ，それに対して垂直に置かれた，二乗検波特性をもつ光検出器で検出する。両光波の成分はそれぞれスカラー関数で，

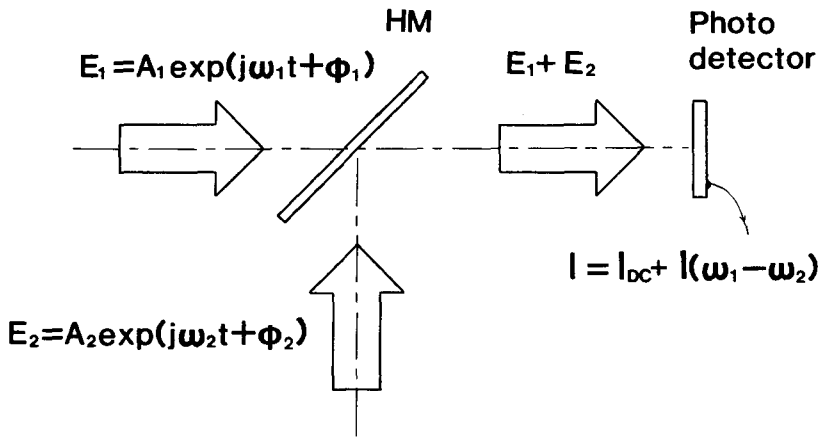


図2.2　ヘテロダイン検波による光周波数差の検出

$$E_1 = A_1 \exp(j\omega_1 t + \phi_1)$$
$$E_2 = A_2 \exp(j\omega_2 t + \phi_2) \qquad (2.2)$$

と書くことができる。いま，両光波の波面（平面波）と偏光が一致しているとすると，光検出器に流れる電流Ｉは

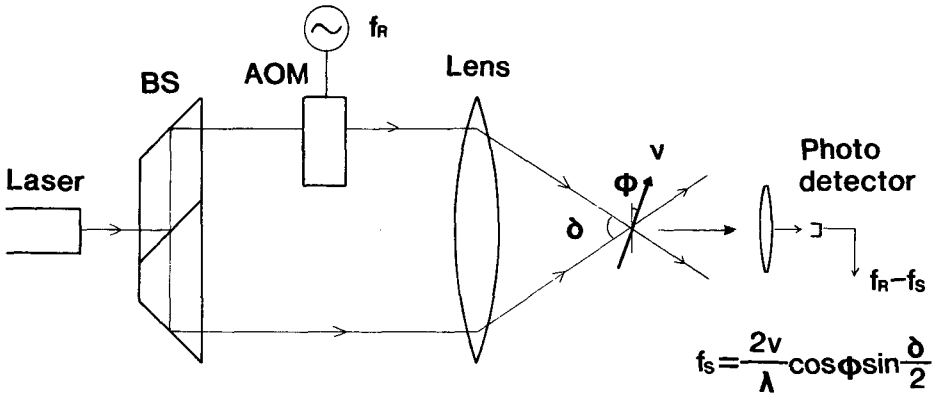
$$I \propto |E_1 + E_2|^2$$
$$= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos((\omega_1 - \omega_2)t - (\phi_1 - \phi_2)) \qquad (2.3)$$

となる。すなわち，光波の強度の和に比例した直流電流 I_{DC}に加えて，それらの周波数の差に等しい周波数のビート信号電流 I_{AC}が得られる。例えばドップラシフトを受けた光（信号光）と，ドップラシフトを受けていない光（参照光）とでヘテロダイン検波を行い，ビート信号の周波数を測定すれば，ドップラシフト周波数が検出できることになる。ただし，本質的に光波の干渉を利用して信号を得ているので，可視度の良い干渉ビートが得られるような構成の光学系とする必要がある。

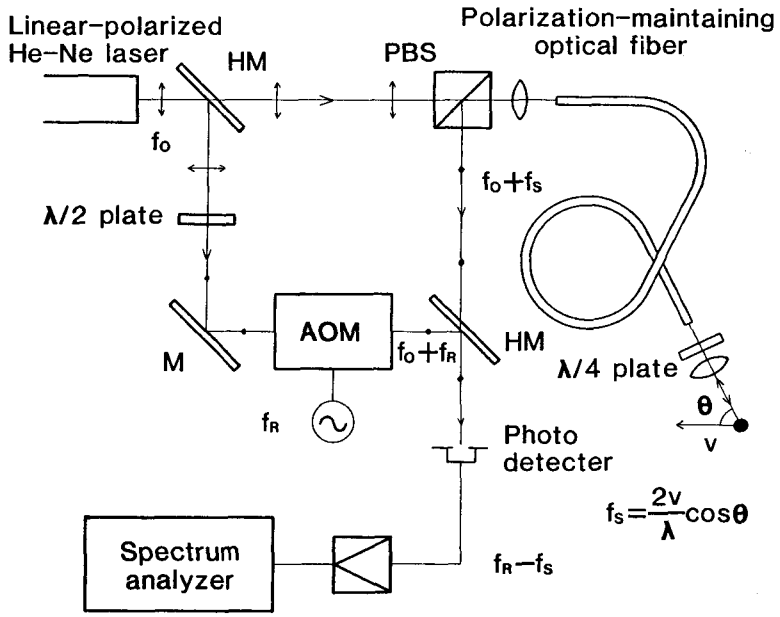
一般にＬＤＶは，(1) 測定物体に影響を与えない非接触の測定が可能である，(2) 信号光をレンズなどで絞り込めば，数十 μm立方程度の空間分解能の高い測定ができる，(3) ビート信号の周波数を測定するので応答が速く，高精度で連続的な測定が可能，など優れた特徴を持っている。(2),(3) については，波長の短い光源を用いた方が，小さなスポット径に絞り込め，またドップラシフト周波数も高くなるので，より時間・空間分解能の高い測定を行うことができる。そのため，実用的には波長 0.488 μmの Arレーザや，波長 0.633 μmの He－Neレーザが光源に用いられている。

2.2.2 ＬＤＶ光学系の構成

実際のＬＤＶシステムは，光源，光検出器，干渉光学系，および信号処理系で構成される。図2.3に現在用いられているＬＤＶ光学系の代表的な構成を示



(a) 差動形



(b) 参照光形

図2.3　ＬＤＶ光学系の構成例

す。レーザの出射光を二つに分割して，(a) では分割した両方の光を移動物体に照射し，散乱光を検出してヘテロダイン検波を行う。(b) では一方の光を移

動物体に照射して，ドップラシフト周波数 f_S を受けた散乱光（信号光）と，もう一方の光（参照光）とでヘテロダイン検波を行う。(a)(b)ともに，分割した一方の光に音響光学変調器ＡＯＭなどで周波数シフト f_R を与えておけば，物体の速度に加えてその移動方向も識別することができる。検出したビート周波数（$f_R - f_S$）を信号処理系で演算して測定物体の速度を計測する。f_S の測定範囲の上限は f_R で制限され，$f_S < f_R$ である。例えば(b)において，$\lambda = 0.633\,\mu m$ で $f_R = 50MHz$ としたとき，$f_S < 50MHz$ から，速度ｖの測定範囲はｖ＜ 15.8m/secとなる（$\theta = 0°$ のとき）。一般に，(a) の光学系のように分割した両方の光を移動物体に照射し，それぞれの光が受けるドップラシフト周波数の差を検出する方法を差動形ＬＤＶ，(b) のように分割した光を参照光と信号光として用いる方法を参照光形ＬＤＶと呼んでいる。特に(b) に示した光学系では，信号光の送受光に光ファイバを用いている。光ファイバを用いることで，２.２.1で述べた特徴に加えて，測定物体と干渉光学系本体とを分離することができ，また，測定物体へ信号光を照射することも容易になる。さらに，干渉光学系内に１/2波長板と偏光ビームスプリッタ，ファイバ先端に１/4波長板を置いて偏光制御を行い，光ファイバに偏波保存ファイバを用いることで，信号光の損失を最小限にしている。

本研究では，図2.３(b) に示した，光ファイバを信号光の送受光に用いた参照光形ＬＤＶ光学系の集積化について検討を行う。この光学系の集積化ができれば，他のより高度な計測用ヘテロダイン干渉光学系の集積化も可能であると考えられるためである。まず，光源に波長 $0.633\,\mu m$ He－Neレーザを光源に用いたこのＬＤＶ光学系の小型・安定化を目的として，その干渉光学系の集積化について検討する。

２.３　Ｚ軸伝搬 Ti拡散 $LiNbO_3$ 導波路

２.３.１　単一モード条件と導波路の作製[3)]

ＬＤＶ用光集積回路デバイスには，位相変調，および偏光制御の機能をもつ

導波形素子を集積化すること，偏波保存ファイバを導波路に接続すること，等を考え合わせると，単一モードチャネル導波路を用いることが必須条件である。チャネル導波路とは，図2.4に示すように，基板上に，屈折率の高い部分を線路状に設けることにより，導波光を基板の深さ方向，横方向に閉じ込めて伝搬させるもので，3次元導波路とも呼ばれる。基板の深さ方向のみに導波光を閉じ込めて伝搬させるスラブ導波路（2次元導波路）に比較して，より狭い領域に光波を閉じ込めるため，光波の分岐・結合・位相変調などの制御を効率良く行うことができる。図は屈折率が階段状に変化するステップインデックス導波路（幅：w，深さ：d）を示している。このとき，単一モード伝搬となる条件は，

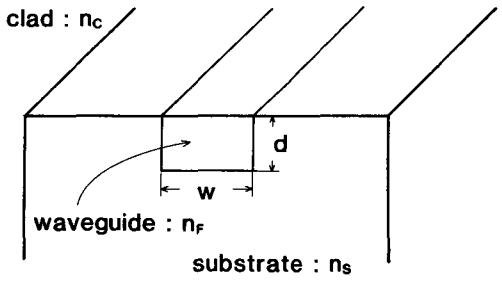


図2.4　チャネル導波路の構造

$$0 \leqq \left(\frac{w}{d} \right) \leqq \frac{\pi}{\sqrt{b_I} \cdot V_I} \qquad (2.4)$$

（ただし，$V_I = k_0 d \sqrt{n_F^2 - n_S^2}$

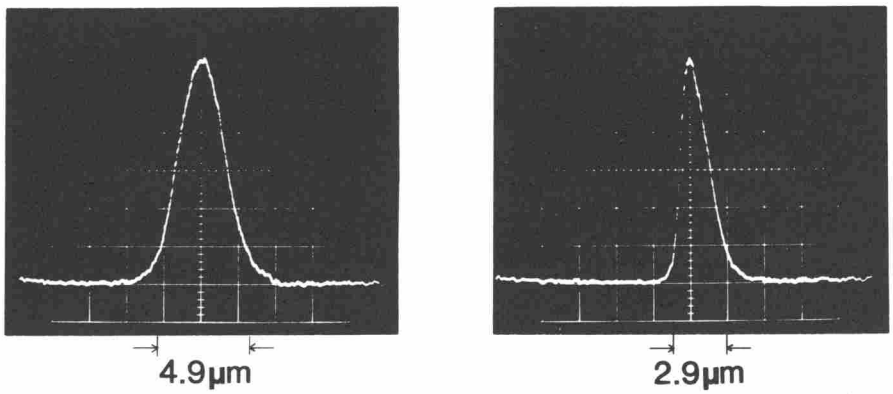
b_I：屈折率分布n_C，n_F，n_S，厚さdのスラブ導波路の規格化導波路屈折率）

である。ここで，k_0 は真空中の波数である。実際の拡散導波路は，屈折率が滑らかに変化するグレーデッドインデックス形であるが，式(2.4) は，単一モード伝搬となる条件の目安を与えてくれる。Z軸伝搬 Ti拡散$LiNbO_3$ 導波路を例にあげると，$\lambda = 0.633\,\mu m$，$n_S = 2.286$，$n_F = 2.29$，$W/T = 2$ とすれば，$1.2\,\mu m < d < 2.0\,\mu m$，$2.4\,\mu m < w < 4.0\,\mu m$ で単一モード伝搬となる。

この条件をもとにZ軸伝搬$LiNbO_3$導波路を作製した。フォトレジストAZ1400−27を塗布したX板$LiNbO_3$基板に，フォトリソグラフィ法によって導波路パターンを露光・現像し，Ti 膜をRFスパッタ装置で堆積した。フォトレジストを剥離して幅 3 μm，膜厚 340Åの Ti薄膜を得た。この基板を温度1000℃，加湿Ar雰囲気中で4時間，その後加湿O_2雰囲気中で1時間かけて熱拡散を行い，Ti 拡散導波路を作製した。拡散後，導波路端面の光学研磨を行った。導波路長は17mmである。

2.3.2 導波路の特性評価

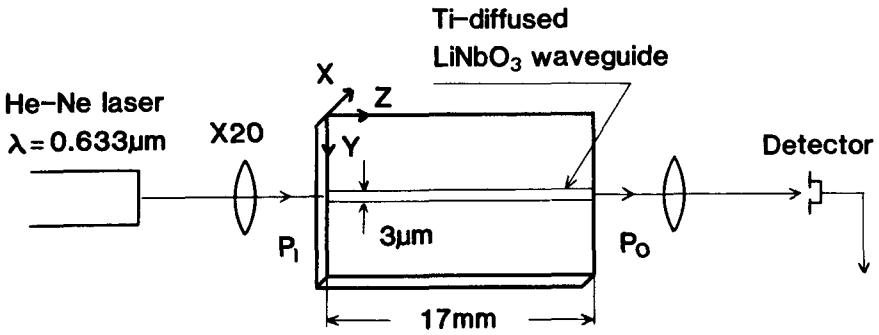
作製したZ軸伝搬$LiNbO_3$導波路に 0.633 μm He−Neレーザ光を入射して，出射光の強度分布を観測した。結果を図2.5に示す。図から作製した導波



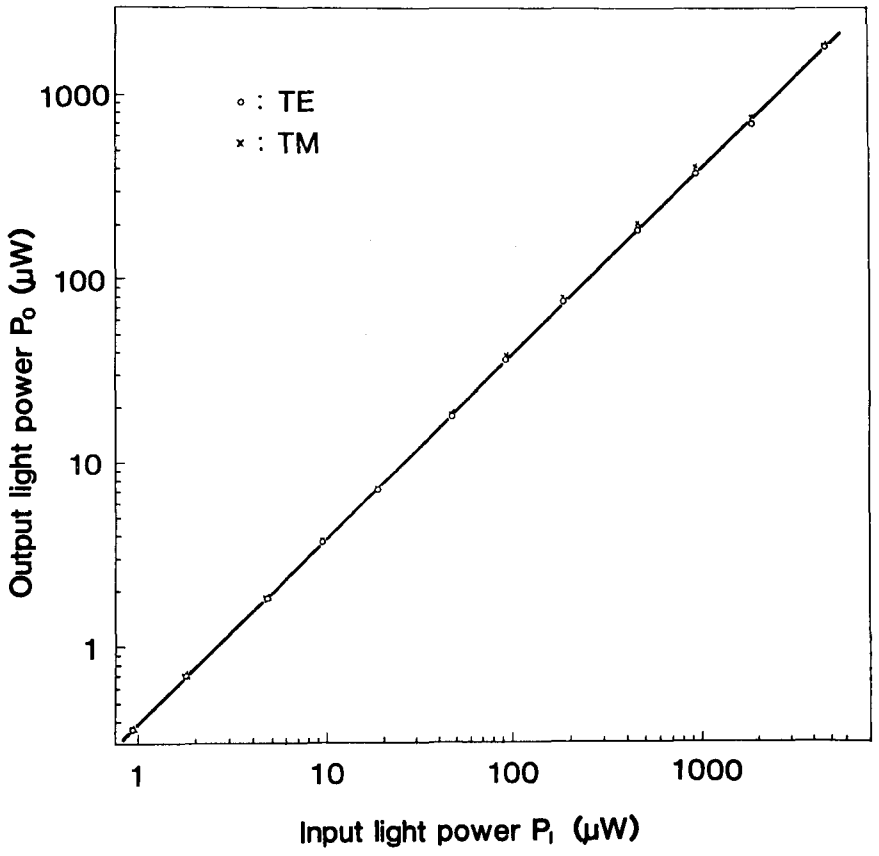
(a) 横方向分布　　(b) 深さ方向分布

図2.5　作製したZ軸伝搬$LiNbO_3$導波路の出射光強度分布(波長0.633 μm)

路が単一モード伝搬となっていることがわかる。強度の$1/e^2$幅は，深さ方向で 4.9 μm，横方向で 2.9 μmであった。次に，この導波路の伝搬損失，光損傷閾値レベル，および導波光の減偏光を調べるために，その入出力パワーを測定した。入力端面から，20倍の対物レンズを用いて導波光を励起し，入射端面における光パワーP_Iに対する出射光パワーP_0の変化を測定した。図2.6 (a)



(a) 測定光学系



(b) 測定結果

図2.6　Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路（17mm長）の入射光パワーに対する出射光パワーの直線的変化

に測定光学系を，(b) に測定結果を示す。導波光パワーが光損傷が生じるレベルを超えると，導波路部分の屈折率が変化し，出射光強度が変化して入出力関係に非直線性が現れる[14]。しかし，作製した導波路では，1mWを超える入射光パワーでも入出力関係に直線性が成立しており，光損傷による出射光強度変化は観測されなかった。作製した導波路の全挿入損失（導波路伝搬損失，入力結合損失，出力端面におけるフレネル反射損失の合計）は，TEモードで 4.3 dB，TMモードで4.0dBであった。別に作製した導波路(45mm長）の挿入損失(TE：6.8dB，TM：6.2dB)と比較すると，伝搬損失は 0.8～0.9dB/cm であり，他の結晶軸方位の Ti拡散$LiNbO_3$ 導波路と同程度であることがわかった。また，45mm長の直線導波路における導波光の減偏光（入射導波モードの出射光強度に対する結合した導波モードの出射光強度比）については ～ 0.5%（−23dB）とほぼ問題ない大きさであった。以上の結果，作製した導波路がLDV干渉光学系を集積化するうえでの導波路材料に適していると考える。そこで，Z軸伝搬 Ti拡散$LiNbO_3$ をLDV用光集積回路デバイスの導波路材料として用いることに決定する。

2.4 導波形干渉計の構成法

図2.7に単一モードチャネル導波路における導波形干渉計の構成例を示す。(a) は，導波光の分岐・合波のためのY分岐導波路を直列に接続した最も基本的な導波形マッハーツェンダー干渉計で，導波路上に位相変調素子を置くことで光強度変調や光スイッチングを行うことができる。しかし，この構成ではデバイス内での光制御しか行えず，速度計測のための信号光の送受ができない。(b) は，分割された導波光を導波路端面に設けた鏡で折り返し，出力光をY分岐導波路で取り出す導波形干渉計である。動作は3-dB方向性結合器，あるいは非対称X分岐導波路を用いた導波形マイケルソン干渉計[18),32)]とほぼ等価である。この構成では，図のように信号光の送受光用光ファイバを一方の導波路端面に接続し，参照光側の導波路上に折り返し形光周波数シフタを集積すれ

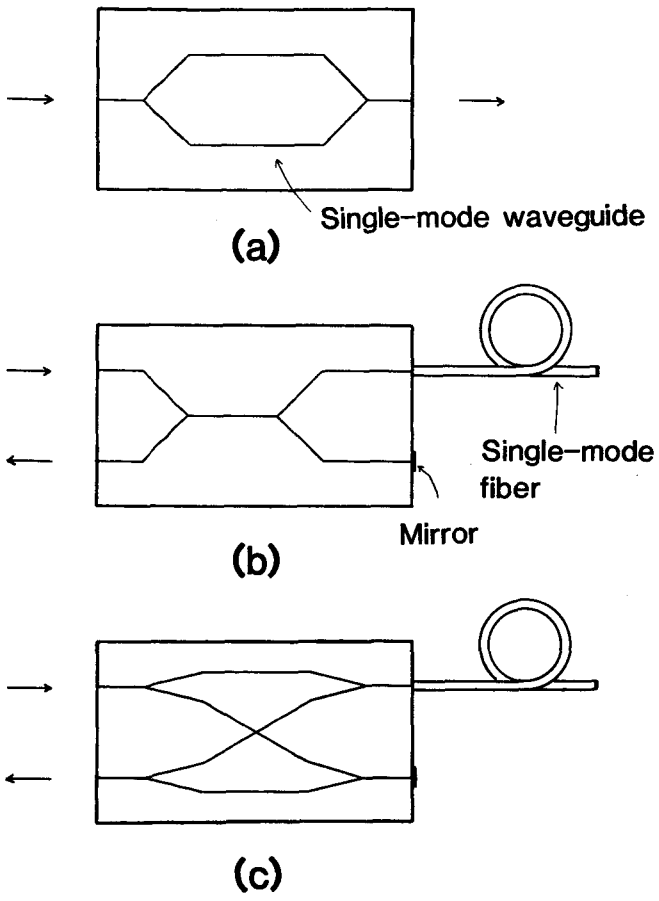


図2.7　単一モードチャネル導波路における導波形干渉計の構成例

ば，最も簡単な，偏光制御を行わない参照光形ＬＤＶ干渉光学系を構成することができる[33]。(c)は入力導波路から出力導波路までを完全に分離した構造で，図2.3(b)のＬＤＶ干渉光学系を忠実に構成できる唯一の導波形干渉計であり，この導波形干渉計を基本としてＬＤＶ用光集積回路デバイスを構成する。

2.5　レーザドップラ速度計測用光集積回路デバイスの提案

以上の検討の結果，決定したＬＤＶ用光集積回路デバイスの構成を図2.8に示す。この構成で図2.3(b)のバルク光学部品によるＬＤＶ干渉光学系をその

まま集積化したものになっている。Y分岐導波路の分岐角は1/50 rad，交差導波路の交差角は1/25 radである。本デバイスでは，音響光学変調器を導波形周波数シフタに，偏光ビームスプリッタをTE－TMモードスプリッタに，1/2波長板をTE－TMモード変換素子に，それぞれバルク光学部品と同じ機能をもつ導波形素子に置き換え，これらの導波形素子を導波形干渉計とともにZ軸伝搬$LiNbO_3$基板上に集積化する。バルク光学系における直交直線偏光を，TE・TM導波モードに対応づけていることになる。モードスプリッタの出力導波路には，信号光送受のための偏波保存光ファイバが接続される。また，参照光用導波路端面にはAl蒸着ミラーが作製される。

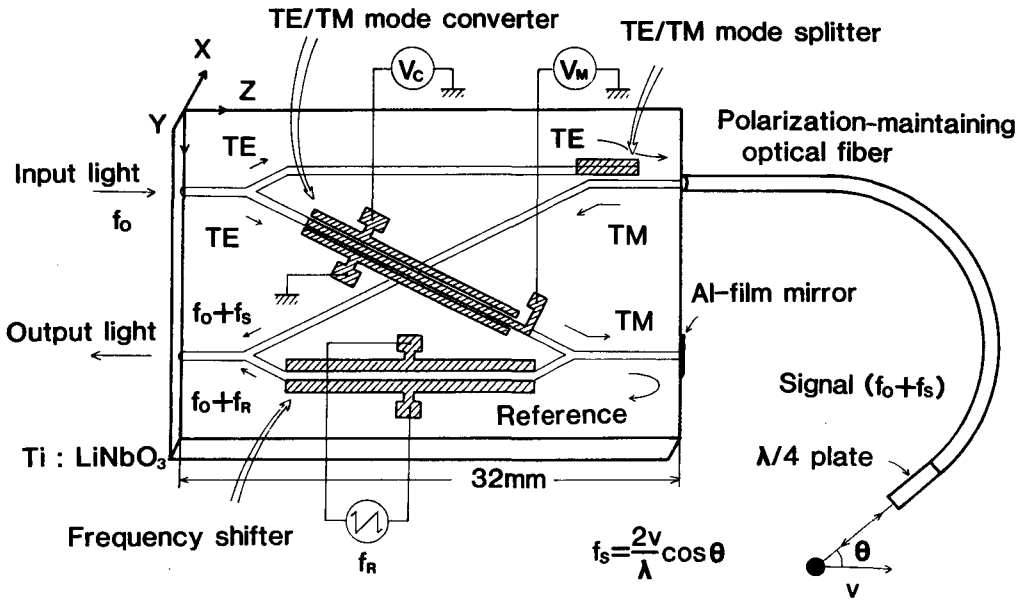


図2.8　提案したLDV用光集積回路デバイスの構成

デバイスに周波数 f_0 なるTE導波モードが励起され，これが最初のY分岐導波路で2等分される。上の導波路に入った光はモードスプリッタを経て偏波保存ファイバに導かれる。ドップラシフトを受けた信号光は，ファイバ先端の1/4波長板を往復するためにその偏波面が90°回転し，再びファイバを通って

デバイスに戻るとTM導波モード（f_0+f_S）となる。これに対して，最初の分岐点で下の導波路に入ったTE導波モードは，モード変換素子でTM導波モードに変換され，デバイス端面のAl蒸着ミラーで反射される。その後，導波形周波数シフタで所定の周波数シフト f_R を受け，周波数（f_0+f_R）の参照光となる。信号および参照導波光を出力部のY分岐導波路で合波し，デバイスの出力光とする。これを検出器でヘテロダイン検波を行うと，周波数（f_R-f_S）なるビート信号が得られ，移動物体の速度と方向を計測できる。

表2.1に，LDV光学系に必要なバルク光学部品と，これに対応する機能を持つ導波形素子との関係を示す。第3章で，これらのうち主要な導波形素子について検討する。

表2.1　バルク光学部品とそれに対応する導波形素子

バルク光学部品	導波形素子
光　　路	導波路
ハーフミラー	Y分岐導波路
鏡	端面蒸着ミラー
音響光学変調器	導波形周波数シフタ
1/2波長板	TE－TMモード変換素子
偏光ビームスプリッタ	TE－TMモードスプリッタ

2.6 結　　言

LDV干渉光学系の集積化の要点を述べ，LDV用光集積回路デバイスを提案した。はじめに，LDV光学系の測定原理と構成について述べ，本研究で集積化の対象とするLDV光学系を示した。次に，Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路を作製して挿入損失，光損傷，減偏光について特性評価を行い，これがLDV干渉光学系を集積化するうえでの導波路材料に適していると考えた。また，チャネル導波路における導波形干渉計の構成法についても検討した。これらの検討

結果をもとにして，ＬＤＶ用光集積回路デバイスを提案し，その構成と動作について述べた。デバイスは，Ｚ軸伝搬$LiNbO_3$基板上に，導波形周波数シフタ，ＴＥ－ＴＭモード変換素子，ＴＥ－ＴＭモードスプリッタを導波形干渉計とともに集積化したものである。出力導波路には信号光送受用の偏波保存ファイバが接続される。さらに，本デバイスに集積化する導波形素子と，ＬＤＶ光学系に含まれるバルク光学部品との対応関係を示した。

第3章　主要導波形素子の検討[34),35)]

3.1 緒　　言

ＬＤＶ用光集積回路デバイスを実現するためには，まず速度計測に必要なブラッグセル，1/2波長板，偏光ビームスプリッタといった光学部品を，それぞれ対応する機能をもつＺ軸伝搬$LiNbO_3$導波形素子に置き換える必要がある。そこで本章では，デバイスに集積化する導波形周波数シフタ，ＴＥ－ＴＭモード変換素子，ＴＥ－ＴＭモードスプリッタの各主要導波形素子について行った検討結果を述べる。これまで，Ｚ軸伝搬$LiNbO_3$を基板とする導波形素子についてはほとんど検討が行われていないため，各導波形素子についてそれぞれ個別に設計・試作・特性測定を行った。

3.2 セロダイン形周波数シフタ

3.2.1 構造と動作原理

$LiNbO_3$単一モードチャネル導波路を用いた周波数シフタとしては，これまで (1)ブラッグ回折を利用したもの[36)]，(2)分岐干渉形変調素子を二重に組み合わせたもの[37)]，(3)常光と異常光のモード変換を利用したもの[38)]，(4)のこぎり歯状の位相変調を行うもの（セロダイン形）[39)]，などが検討されている。本デバイスの導波形周波数シフタには，Ｚ軸伝搬$LiNbO_3$導波路上で構成でき，かつ構造が簡単でデバイスに集積化しやすい (4)のセロダイン形周波数シフタを用いることにする。

セロダイン形周波数シフタは，導波モードに$\pm n\pi$をピークとするのこぎり歯状の位相変調を与えるもので，マイクロ波の周波数シフタとして提案されたものである[40)]。いま，入力光波$E_I = A\exp j\omega t$に$\phi(t) = \alpha t$なる位相変調を与えた時，出力光波E_oは，

$$\begin{aligned} E_o &= A\exp j(\omega t + \phi(t)) \\ &= A\exp j(\omega + \alpha)t \end{aligned} \qquad (3.1)$$

となるため，その周波数が$\alpha/2\pi$だけシフトする。実際には，$\phi = 0$と$2n\pi$をピークとするのこぎり歯状の位相変調を与えることになる。図3.1にZ軸伝搬$LiNbO_3$を基板とするセロダイン形周波数シフタの構造を示す。素子は，r_{22}による導波形位相変調素子である。電極に周波数f_R，ピークピーク値$V_R = 2V_\pi$ののこぎり歯状電圧を印加したとき，出力光の周波数がf_Rだけシフトする。ここで，V_πは位相変調素子の半波長電圧である。

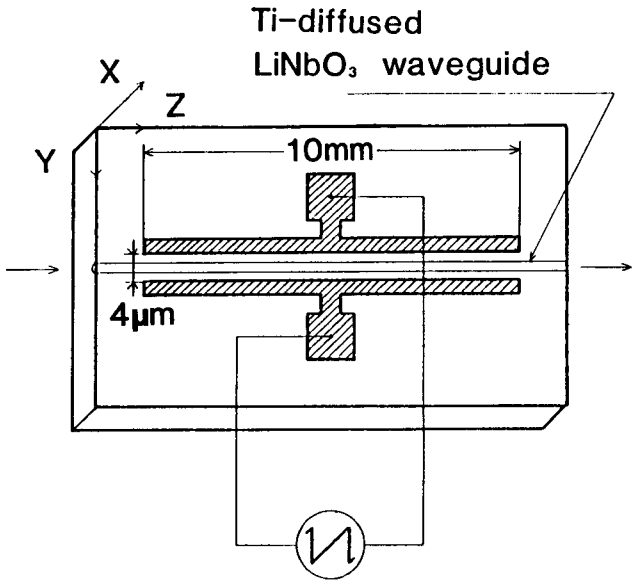


図3.1　セロダイン形周波数シフタの構造

セロダイン形周波数シフタの出力光の周波数スペクトル純度は，印加のこぎり歯状電圧の波形，特にその立ち下がり時間δとその周期Tとの比T/δ，およびその振幅に依存する。例えば，周波数f_Rの印加のこぎり歯状電圧が$\delta \neq 0$，あるいは$V_R \neq 2V_\pi$であると，所望の周波数成分（$f_0 + f_R$）以外に不要の周波数成分（$f_0 + mf_R$）（m：整数）が発生する。ＬＤＶ用光集積回路デバイスにおいては，ビート信号スペクトルの信号対雑音比（ＳＮ比）は，参照光の所望の周波数成分（$f_0 + f_R$）に対するイメージ周波数成分（$f_0 - f_R$）の振幅比（イメージ抑圧比）によって制限される。そこで，このイメージ抑圧比と印加電圧

振幅との関係をT/δをパラメータとして計算した。印加電圧を非対称三角波とし，このときの出力光波形をフーリエ級数展開してイメージ抑圧比を求めた。図3.2に計算結果を示す。理想的な場合として，$\delta = 0$ では $V_R/V_\pi = 2$ で完

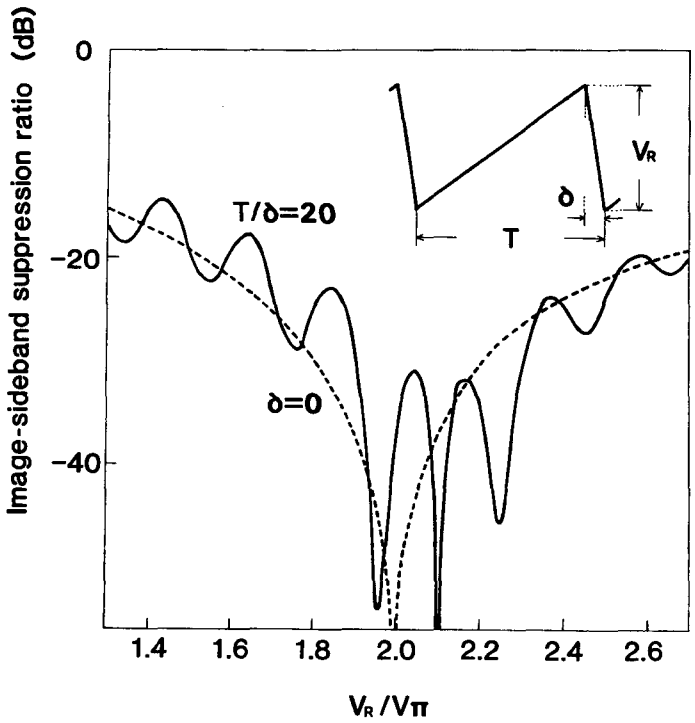


図3.2　セロダイン形周波数シフタの印加のこぎり歯状電圧振幅に対するイメージ抑圧比の関係

全な単一側帯波発生が可能である。しかし，実際にはのこぎり歯状電圧の立ち下がり時間は無限小ではなく，イメージ抑圧比は印加電圧振幅に対して複雑な変化を示す。実験に用いた発振器（Wavetek：Model166）では周波数500kHzにおいてT/δ～20であり，この場合には $V_R/V_\pi = 2.1$ で最大のイメージ抑圧比が得られることがわかった。

3.2.2　出力光の周波数スペクトル

実際にZ軸伝搬$LiNbO_3$基板を用いてセロダイン形周波数シフタを試作し

た。素子は，幅 3 μmの Ti拡散導波路上に，長さ10mm，間隔 4 μmのAlプレーナ電極を装荷して位相変調素子を構成したものである。波長 0.633 μm において位相変調素子の半波長電圧 V_π =14Vであった。試作した素子の出力光の周波数スペクトルを観測した。図3.3に測定光学系を示す。マッハーツェンダー干渉計の一方のアームに試作したセロダイン形周波数シフタを，他方に音響光学変調器（変調周波数 f_A =45MHz）を挿入して干渉出力信号の周波数スペクトルを観測した。このとき，周波数シフタの印加のこぎり波電圧振幅をイメージ抑圧比が最大になるように調整した。観測結果を図3.4に示す。のこぎり歯状電圧（T/δ～20）の繰り返し周波数 500kHzのとき，

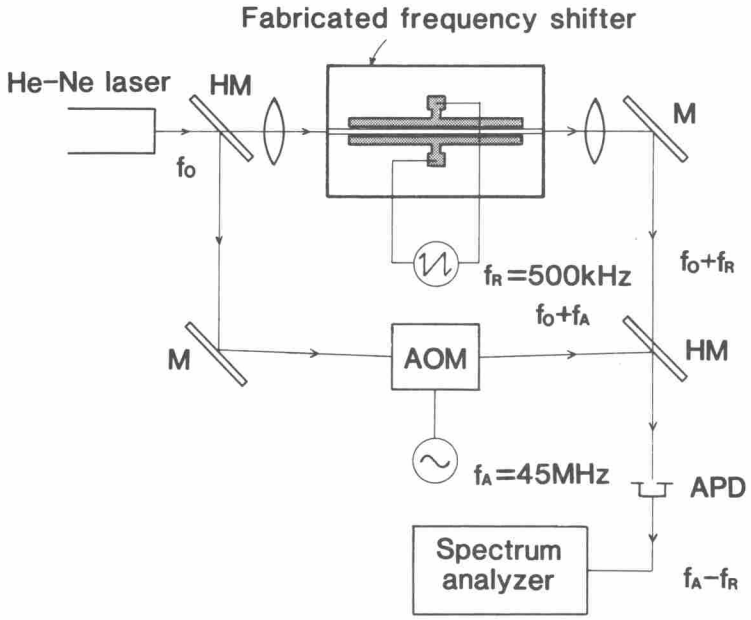


図3.3　セロダイン形周波数シフタの出力光スペクトルの測定光学系

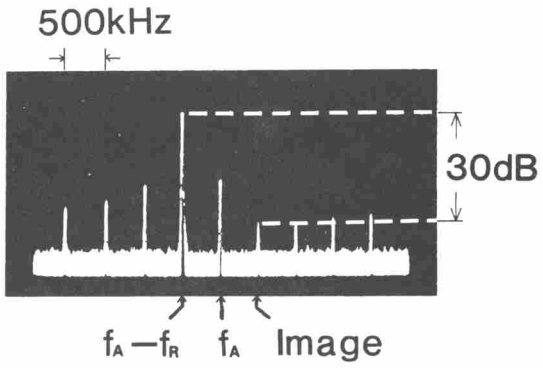


図3.4　観測した周波数スペクトル

V_R=29Vでイメージ抑圧比−30dBを得た。ほぼ計算値に近い印加電圧振幅で最大のイメージ抑圧比が得られることが確認できた。イメージ比の計算値との差異は，主に印加のこぎり歯状電圧波形のわずかな非直線性や立ち下がり部分のなまりが原因であると考えている。

3.3 TE−TMモード変換素子

3.3.1 構造と動作原理

Z軸伝搬$LiNbO_3$結晶は等方性であるため，その屈折率楕円体は円であるが，結晶のX軸に沿って電界を印加すると，電気光学定数r_{61}を介して主軸がX軸に対して45°回転した楕円となる。そのため，Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路において，X軸に沿って電界印加すると，TE・TM両導波モードの間で結合が生じる[41]。このとき，モード結合理論により，結合係数κは印加電界E_x^eに対して，

$$\kappa = \Gamma \frac{\pi}{\lambda} r_{61} n_0^3 E_x^e \qquad (3.2)$$

となる[42]。Γは印加電界分布と導波モードの界分布の重なりによって決まる印加電界低減係数である。高効率のモード変換を行うためには，TE・TM両モードの伝搬定数差$\Delta\beta$に対して$\Delta\beta/2\kappa \ll 1$とする必要があるが，Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路では両モードはほぼ縮退しており（$\Delta\beta \fallingdotseq 0$），導波路分散によって生じるわずかな伝搬定数差も，結晶のY軸方向に沿って電界を印加すれば，電気光学定数$r_{12}(=-r_{22})$，r_{22}を介して$\Delta\beta=0$（位相整合状態）とすることができる[43),44)]。このように，結合係数κと位相整合を独立に調整できる，3電極構造を有するZ軸伝搬$LiNbO_3$モード変換素子について検討した。

図3.5に素子の構造を示す。側電極に位相整合用電圧V_C，中央電極に結合係数調整用電圧V_Mを印加すると，それぞれY，X方向の電界が発生する。い

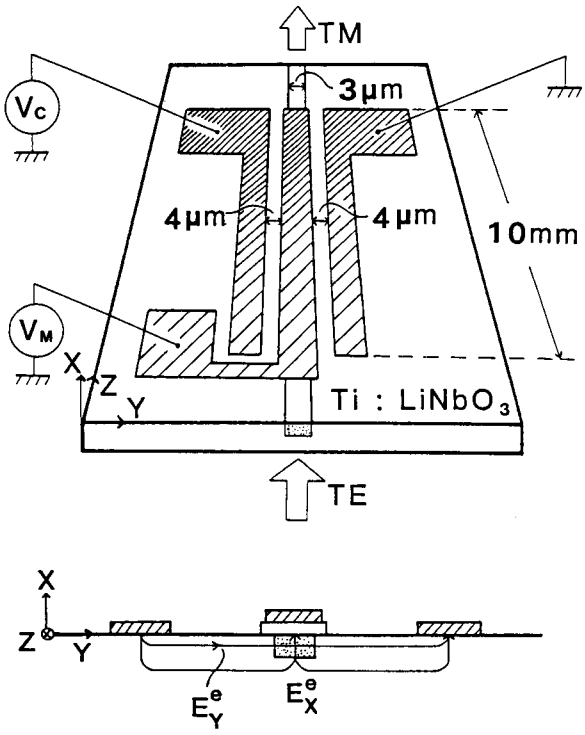


図3.5 TE－TMモード変換素子の構造

ま，V_cを位相整合状態となるように，かつ，V_Mを電極長Lに対して，$\kappa L = \pi/2$となるように設定したとき，入力TE導波モードは 100%TMモードに変換される。このモード変換素子は，位相整合に櫛形電極[45] を用いていないので，使用波長帯域が広く，温度変化に対して安定であるのが特徴である。

3.3.2 モード変換特性

幅 3μmの Ti拡散導波路上に，プラズマCVD法で厚さ1000ÅのSiO$_2$バッファ層を堆積し，O_2 雰囲気で 600℃，3時間アニールを行った後，長さ10 mm，間隔 4μmの電極を装荷して素子を作製した。入力にTE導波光を励起し，位相整合用電圧V_cで位相整合状態として，モード変換用電圧V_Mに対するTEおよびTM出力光強度の変化を観測した。図3.6に観測した結果を示す。

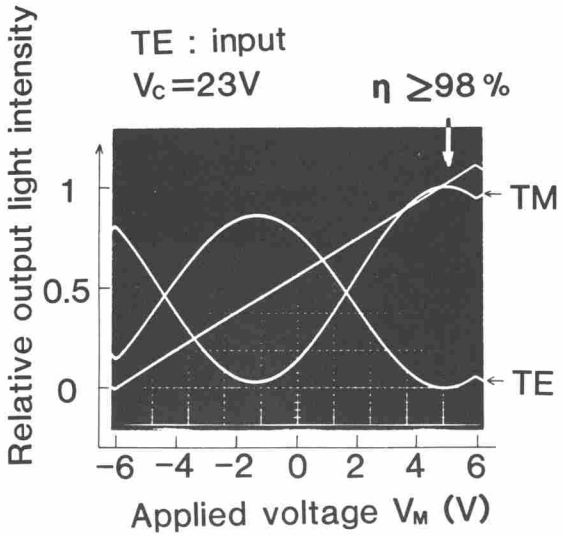


図3.6　モード変換特性

位相整合条件を満たすV_cは，TE・TM両導波モードの実効屈折率差，すなわちTi 拡散条件や，導波光の伝搬軸と結晶のZ軸との角度ずれ[46]などに依存する。作製した素子では Ti膜厚 350Å，導波光の伝搬軸のZ軸に対する傾き～1/50radで，このときV_c＝23Vのとき位相条件が満足され，V_M＝4.8Vにおいて，変換効率$\eta \geqq 98\%$を得た。

3.4　TE－TMモードスプリッタ

3.4.1　構造と動作原理

Z軸伝搬$LiNbO_3$では二つの直交導波モードがほぼ縮退しているために，モード変換は容易である。これに対して，TEとTMモードの光路を分離するためには，両導波モードの伝搬特性に顕著な差異が生ずることが条件であり，導波路自体の複屈折性が大きい方が有利である[47)-50)]。本来，等方性結晶であるZ軸伝搬$LiNbO_3$において，導波路のモード分散（10^{-5}オーダ）だけでモードスプリッティングを行うことは困難である。

さて，導波路表面に金属を装荷すると，TMモードの実効屈折率がTEモードに比べて大きく低下し，その伝搬損失が増加することが知られている[51)]。この現象に着目して，新しい構造のTE－TMモードスプリッタを提案・検討した。素子は，導波路幅の異なる非対称方向性結合器の太い側の導波路上に金属膜を直接装荷したものである。構造を図3.7に示す。今，導波路Bに金属膜を装荷した状態で，TEモードにおけるA・B導波路間の位相不整合$\Delta\beta_{TE}$＝

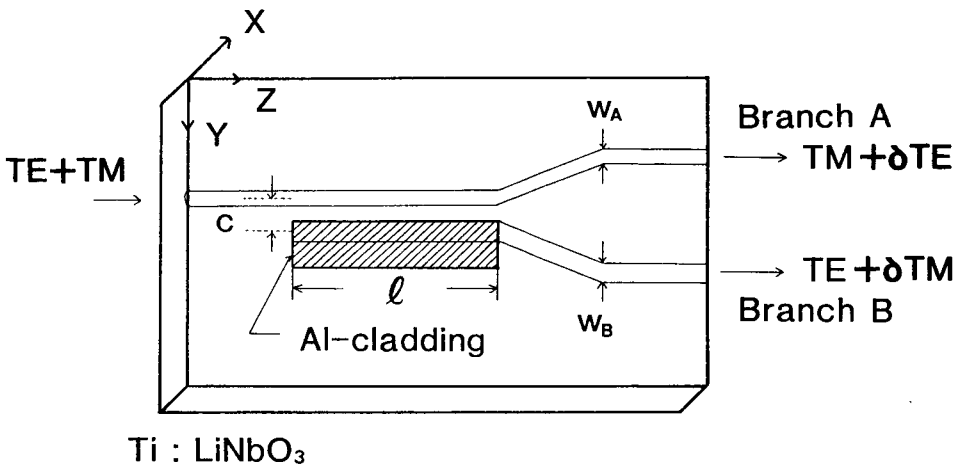


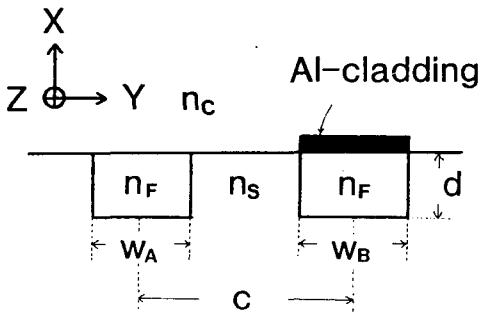
図3.7　TE－TMモードスプリッタの構造

0となるように，導波路幅の非対称性Δw（$=w_B-w_A$）を設定しておく（$w_A<w_B$）。この条件の下で，結合器の長さℓをTEモードに対して完全結合長L_cと等しくしておけば，導波路Aから入射したTE導波モードはすべて導波路Bから出射される（パワー：P_B^{TE}）。一方，TMモードに対しては装荷金属の影響で位相不整合$\Delta\beta_{TM}$が生じており，$\Delta\beta_{TM}/\kappa\sim 2/\sqrt{3}$であれば，入射したTMモードはそのまま導波路Aから出射される（パワー：P_A^{TM}）。ここで，κは結合部分の偶・奇モードの伝搬定数差から決まる結合係数である。このようにして，Z軸伝搬$LiNbO_3$のような異方性の小さい導波路でもTE－TMモードスプリッタを構成することができる。

3.4.2　動作の検討と設計

モードスプリッタの装荷金属としては，装荷したときの実効屈折率変化が大きく，かつ吸収損失の小さい金属が望まれる。このような要求を満たす金属として，複素誘電率の実部が大きく，虚部の小さなAlが適当である。Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路上にAlを装荷したとき，TMモードの実効屈折率変化が$1\sim 2\times10^{-4}$であるのに対してTEモードに対してはその20%程度である。

3.4.1で述べた原理に基づき，素子特性の理論的検討を行った。方向性結合器部分の導波路モデルを図3.8に示す。まず，(1) 入力導波モードの界分布ψ_a，および結合器部分の偶・奇モードの伝搬定数β_e，β_o，およびその界分布ψ_e，ψ_oを求めた。ここでψ_e，ψ_oは，複素伝搬定数β_e，β_oの実部から計算した。次に，(2) 入力導波路と結合器入力端における境界条件を考慮して，結合器に励起される偶・奇モードの展開係数 a_e，a_oを式(3.3) から求めた。



n_C=1.0　　w_A=3.0μm
n_F=2.29　　c=7μm
n_S=2.286　　d=1.8μm

図3.8　結合器部分の導波路モデル

$$a_e = \frac{\int \psi_a \psi_e}{\sqrt{\int \psi_a^2 \int \psi_e^2}}, \qquad a_o = \frac{\int \psi_a \psi_o}{\sqrt{\int \psi_a^2 \int \psi_o^2}} \tag{3.3}$$

さらに，(3) 結合器終端と出力導波路界における境界条件から，二つの出力導波路の導波光パワーP_AとP_Bを求めた。例えば，P_Aについては，

$$P_A = |b_{ea} + b_{oa}\exp(-j\,|\beta_e - \beta_o|\,\ell)|^2 \tag{3.4}$$

$$\left.\begin{aligned} \text{ただし，}\ b_{ea} &= \frac{a_e \exp(-j\alpha_e \ell)\int \psi_a \psi_e}{\sqrt{\int \psi_a^2 \int \psi_e^2}}, & \alpha_e &= \mathrm{Imag}(\beta_e) \\ b_{oa} &= \frac{a_o \exp(-j\alpha_o \ell)\int \psi_a \psi_o}{\sqrt{\int \psi_a^2 \int \psi_o^2}}, & \alpha_o &= \mathrm{Imag}(\beta_o) \end{aligned}\right\}$$

TE，TM両導波モードについて上記 (1)～(3) の手順で計算を行い，所望の側の導波光パワーP_B^{TE}, P_A^{TM}，およびその反対側の導波光パワーδP_A^{TE}，δP_B^{TM}を求めた。これらの値から，素子の性能指数として，モードスプリッティング比（MS比）と吸収損失を以下のように定義する。

$$\text{MS比} = \begin{cases} 10\log(P_B^{TE}/\delta P_A^{TE}) & (\text{TEモード}) \\ 10\log(P_A^{TM}/\delta P_B^{TM}) & (\text{TMモード}) \end{cases} \tag{3.5}$$

$$\text{吸収損失} = \begin{cases} 10\log((\delta P_A^{TE}+P_B^{TE})/P_{IN}^{TE}) & (\text{TEモード}) \\ 10\log((P_A^{TM}+\delta P_B^{TM})/P_{IN}^{TM}) & (\text{TMモード}) \end{cases} \tag{3.6}$$

ただし，P_{IN}^{TE}, P_{IN}^{TM}は，TE，TMモードにおける入力導波パワーである。

このようにして，結合器の導波路幅の非対称性Δwを変化させたときのMS比と吸収損失の関係を計算した。導波路Aの幅w_A=3.0 μm，結合器の導波路中心間隔c = 7 μmとした計算結果を図3.9に示す。この結果から，導波路に

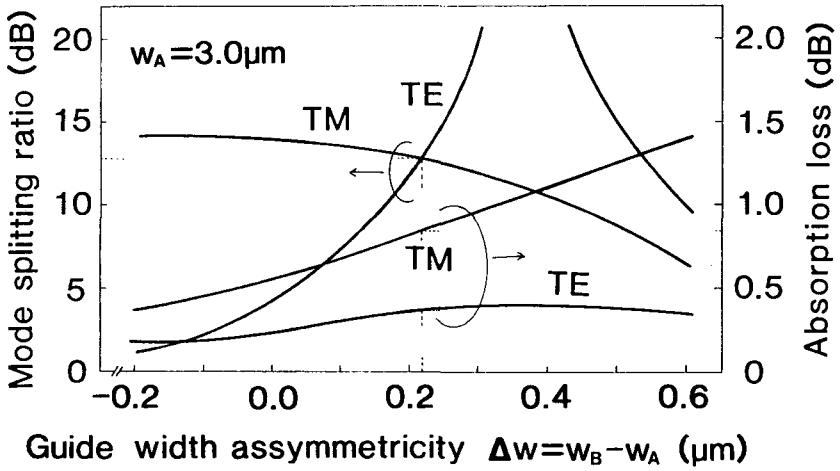
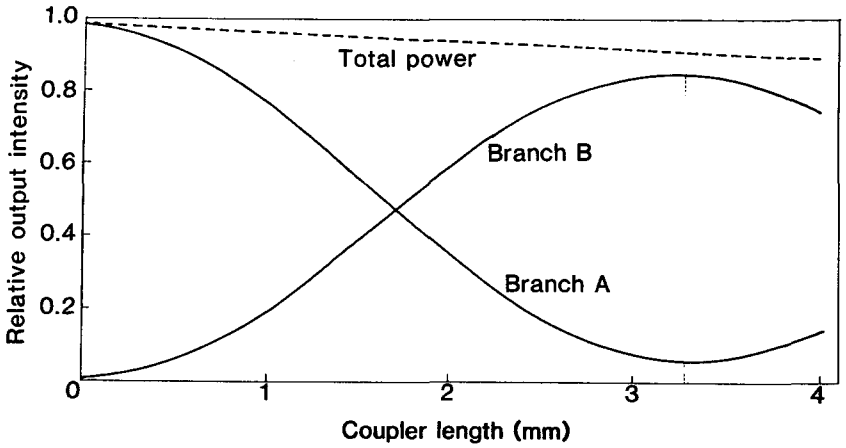


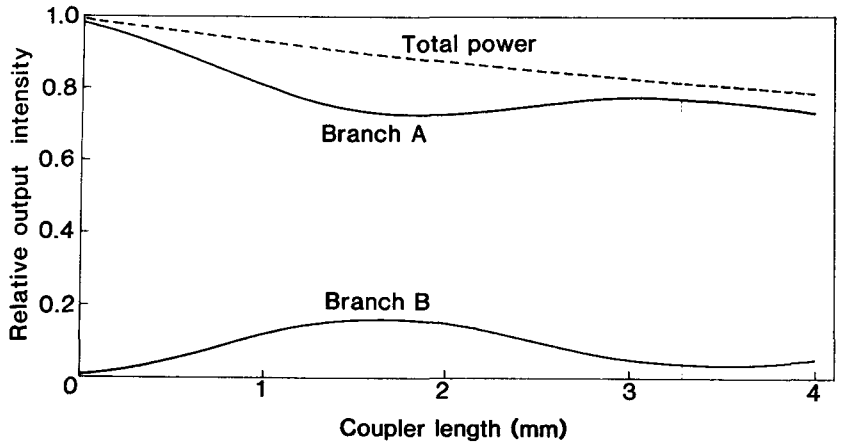
図3.9　導波路幅の非対称性に対するモードスプリッティング比と吸収損失の関係

0.37 μmの非対称性を与えw_B=3.37 μmとすると，$\Delta\beta_{TE}$ = 0となってTEモードのMS比が最大となる。しかしながら，非対称性を増やすと$\Delta\beta_{TM}$が小さくなるためにTMモードのMS比が低下する。また，装荷金属の影響が大きくなるので吸収損失が増加する。そのため，非対称性の最適値は 0.22 μmで，w_B=3.22 μmとしたとき，両モード共にMS比12.8dBが得られることがわかった。このとき，結合器長ℓ = 3.2mmである。金属装荷による吸収損失はT

Mモードにおいても 0.84dBであり，A1 の複素誘電率の虚部の影響は小さいといえる。図3.10(a)(b)に，このときの結合器の伝搬軸に沿ったＴＥ・ＴＭ導波光パワーの移行の様子を示す。



(a) TE mode



(b) TM mode

図3.10　結合器内でのパワー移行の様子

3.4.3　特性測定

モードスプリッティングの動作を確認するため，3.4.2の計算結果をもとに，

Z軸伝搬$LiNbO_3$基板上に非対称方向性結合器をパラメータを変えて複数個パターニングして素子を作製した。導波路のパターニングは，第4章で述べるレーザビーム描画装置を用いて行った。Ti拡散後，導波路上に幅20 μmのAl膜を，その長辺が方向性結合器の中心線と一致するように装荷した。また，分岐角1/50rad の分岐出力導波路間の結合を避けるために，装荷Al膜を，結合器より 100 μm長くした。作製した素子は，Ti 膜厚 360Å，w_A=3.1 μm，w_B=3.1，3.3，3.4，3.5 μm，c =7 μm，ℓ =2.6，2.9mmである。

素子の入力端面からTEまたはTM導波モードを励起した。導波光のわずかな減偏光の影響を受けないように，検光子を通して出射光強度を測定し，MS比を求めた。図3.11に測定結果を示す。結合器長ℓ = 2.6mmの結合器におい

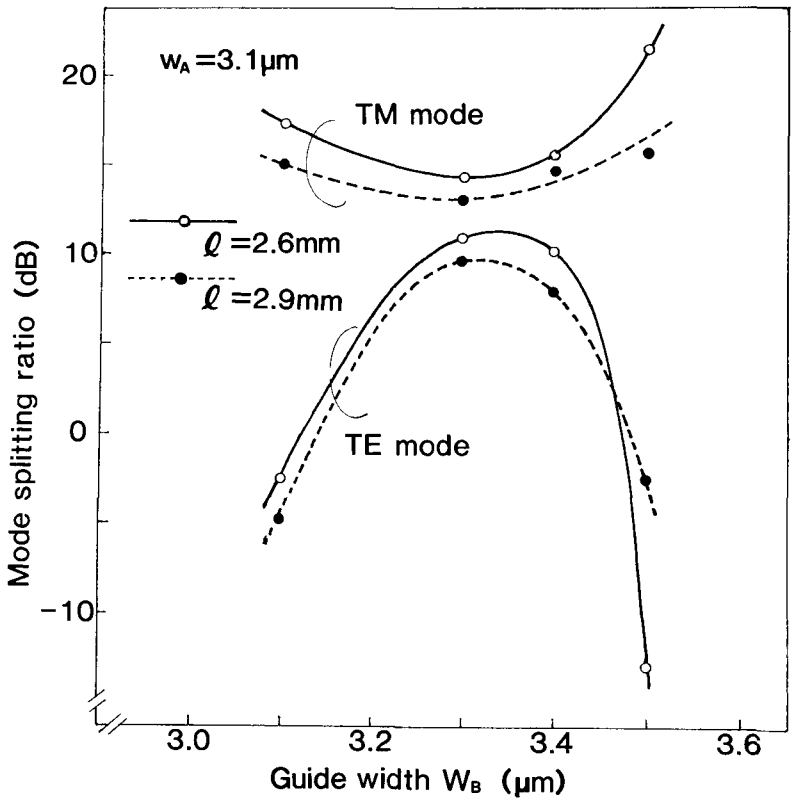
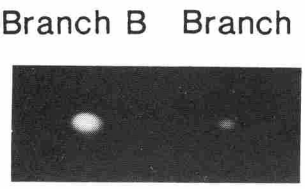
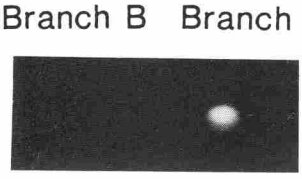


図3.11　試作した金属装荷非対称方向性結合器の導波路幅w_Bに対するモードスプリッティング比の変化

て，w_B=3.3μmのとき，TE・TMモードのMS比11dB，15dBが得られた。このとき，金属装荷による吸収損失は両モードとも～1.5dBであった。図からわかるように，方向性結合器に0.2～0.3μmの非対称性を与えたときにTEモードのMS比が最大値を示しており，金属装荷による実効屈折率変化は計算値ほど大きくないと考えられる。これは，結合器のモデルをステップインデックス近似としたためであると考えている。また，TMモードについては，導波路Bの幅w_Bが大きくなるほどMS比が上昇しているが，この理由は明らかでない。作製したℓ=2.6mmのモードスプリッタの入力端面からTEおよびTM導波モードを励起したときの出力光の近視野像を図3.12(a)，(b) に示す。両導波モードについて，モードスプリッティングが行われていることがわかる。



(a) TE : input



(b) TM : input

図3.12　出力光の近視野像

3.5 結　言

提案した光集積回路デバイスの主要導波形素子である周波数シフタ，TE－TMモード変換素子，TE－TMモードスプリッタについて個別に試作・特性測定を行ない，以下のように，それぞれZ軸伝搬$LiNbO_3$導波路上に構成できることを確認した。

(1) 周波数シフタ：　デバイスに集積化しやすいことを考慮して，位相変調素子にのこぎり歯状電圧を印加するセロダイン形周波数シフタについて検討した。印加のこぎり歯状電圧（周期：T，ピークピーク値：V_R）の立ち下がり時間δが出力光のイメージ抑圧比に与える影響を計算し，T/δ=20のとき，V_R/V_π = 2.1で最大のイメージ抑圧比が得られることがわかった。作製した電極

間隔 4 μm，電極長10mmの素子において，周波数シフト量 500kHz のとき，印加電圧V_R～29Vでイメージ抑圧比－30dBが得られた。

(2) TE－TMモード変換素子： プレーナ3電極構造からなるTE－TMモード変換素子について検討した。作製した電極間隔 4 μm，電極長10mmの素子において，位相整合用電圧V_C＝23V，結合係数調整用電圧V_M＝4.8Vのとき，98%以上の変換効率を得た。

(3) TE－TMモードスプリッタ： 導波路上に金属を装荷することによって生じる異方性を利用した，非対称方向性結合器の一方の導波路上に金属を装荷した構造のモードスプリッタを提案・検討した。Al を装荷金属に選んでモードスプリッタの特性の理論的検討を行い，0.22 μmの非対称性を与えたときに，両モードで 12.8dBのMS比が得られることがわかった。この結果をもとに素子を作製し，導波路幅w_A＝3.1 μm，w_B＝3.3 μm，導波路中心間隔c＝7 μm，結合器長ℓ＝ 2.6mmの素子において，TE，TMモードに対してそれぞれMS比 11dB，15dB，吸収損失 1.5dBが得られた。

第4章　レーザドップラ速度計測用光集積回路デバイスの試作・特性測定[52),53)]

4.1 緒　　言

本章では，まずはじめにＬＤＶ用光集積回路デバイスの作製手順を述べる。デバイス作製においては，全長30mmを超える導波路パターニングと，偏波保存光ファイバと導波路の高効率結合が重要な課題である。そこで，本デバイスの導波路パターニングを行うために開発したレーザビーム描画装置，および光ファイバと導波路の結合法について述べる。次に，実際に作製したデバイスを用いて行った移動鏡の速度計測実験の結果について述べる。

4.2 デバイスの作製手順

図4.1にデバイスの作製手順を示す。以下，図にしたがって作製手順を説明する。

$LiNbO_3$ 基板切り出し，洗浄

直径２インチ１mm厚Ｘ板$LiNbO_3$ 基板を半分に切断する。切断後，トリクロルエチレン，中性洗剤，精製水の順に超音波洗浄を行った。

フォトレジスト塗布・プリベーク

基板の脱水ベークを行った後，ポジ型フォトレジストＡＺ1400－27を5000rpm 30秒間回転塗布し，温度90℃，20分間でプリベークを行った。

導波路パターニング（4.3で詳述）

レーザビーム描画装置でデバイスの導波路パターンを露光した。露光後，マイクロポジット現像液：１，水：５の希釈液（25℃）に90秒間浸すと導波路パターンを得る。

Ｔｉスパッタ，リフトオフ

導波路パターニングを行った基板上に，ＲＦマグネトロン型スパッタ装置でＴｉ膜を堆積した。ＲＦ進行波電力100W，Ａｒ 圧力5×10^{-3}torrで75秒間堆積

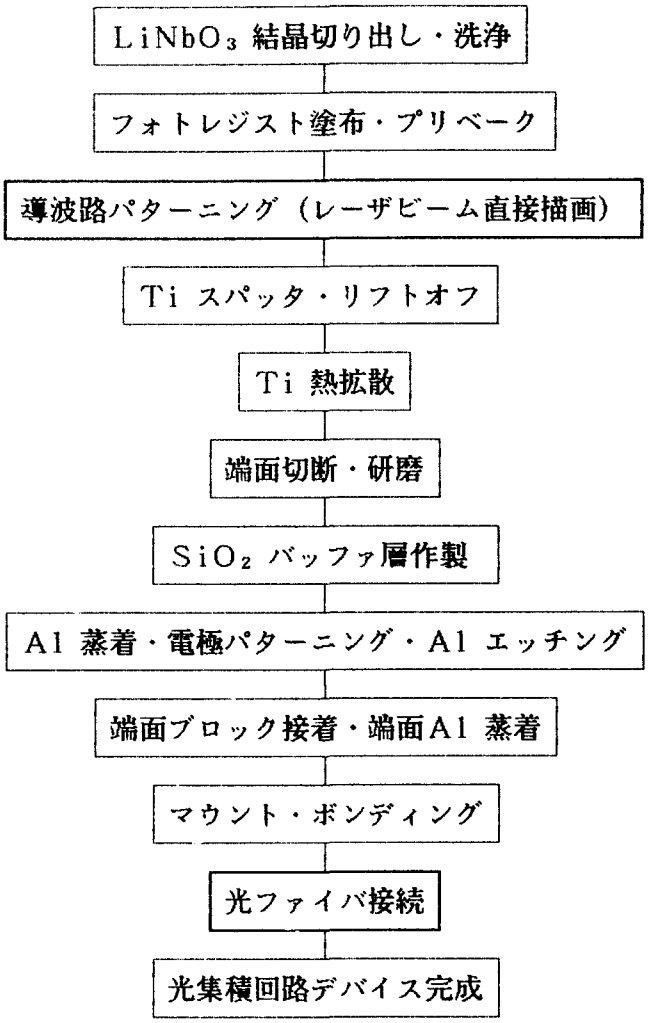


図4.1　ＬＤＶ用光集積回路デバイスの作製手順

し，膜厚 350Åを得た。スパッタ後，レジストを剥離して，Ti薄膜導波路パターンを得る（リフトオフ）。

Ti熱拡散

リフトオフ後，Ti熱拡散を行った。拡散条件は温度1000℃，加湿Ar雰囲気中で4時間，その後加湿O_2雰囲気中で1時間である。

端面切断・研磨

試料端面を導波路に対して垂直に切断する。端面Al 蒸着ミラーの反射率を考慮して，0.5°以下の誤差で垂直度を設定する必要がある。導波路に対して完全に垂直に研磨されたとき，82.1%の反射率が得られる。次に自動研磨器で，両端面の光学研磨を行った。研磨は3段階に分けて行い，それぞれ16 μm，3 μm，1 μm径の研磨材を用いた。

SiO_2バッファ層作製

SiO_2バッファ層をプラズマCVD法で作製する。バッファ層は，導波路上の電極金属によるTM導波モードの吸収損失を低減するために必要である。プラズマCVD法で作製されたSiO_2バッファ層は，スパッタ法で作製されたものと比べて導波路表面の損傷が少なく，直流ドリフトが低減される。堆積の際，TE－TMモードスプリッタの部分はカバーガラスなどのマスクで覆っておく。SiH_4 およびN_2Oの流量10cc/min，40cc/min，RF進行波電力5Wで 210秒間堆積し，1000Å厚のSiO_2薄膜を得た。バッファ層作製後，O_2 雰囲気中で600℃，3時間のアニールを行い，SiO_2薄膜の酸素欠損を減少させた。

Al 蒸着・電極パターニング・Al エッチング

試料表面にAl を熱蒸着する。蒸着後，フォトレジストAZ1400－17を回転塗布し，プリベークを行った（90℃，20分間）。あらかじめレーザビーム描画装置を用いて作製した電極およびモードスプリッタ用マスクパターンを，フォトリソグラフィ法によって転写した。現像後，Alエッチング液（H_3PO_4：15，CH_3-COOH：4，HNO_3：1）に浸した。エッチングが完了すると，デバイスの主要導波形素子が形成される。

端面ブロック接着・端面Al 蒸着

ファイバ接続のために，試料端に$LiNbO_3$ ブロックをUV光硬化樹脂で接着した。次に参照光用導波路端面にAlを熱蒸着して反射ミラーを形成する。このとき，信号光用導波路端面はナイフエッジでマスクした。試料の両端面が光学研磨されていれば，低倍率の落照式顕微鏡で導波路スポットが目視できる

ので，エッジの位置合わせは比較的容易に行える。作製したAl蒸着ミラーの反射率は～40%であった。

マウント・ボンディング

ＯＳＭレセプタクルを取り付けたAl Ｌアングル（40mm長）上に，試料を固定した。固定後，レセプタクルに銅線（～0.18mm φ）の一端を半田付けし，他端を導波形素子の電極パッドにAgペーストで接着した。

光ファイバ接続（4.4で詳述）

偏波保存ファイバと導波路との結合を行ってデバイスは完成する。

4.3 レーザビーム描画による導波路パターニング

4.3.1 レーザビーム描画装置

通常，光集積回路デバイスの導波路パターニングには，一般的なフォトリソグラフィ法が用いられている。しかしながら，ＬＤＶ用光集積回路デバイスは，全長が30mmを超えるため，導波路パターニングにフォトリソグラフィ法を用いることができない。このような大面積にわたって精度よく導波路パターンを得る方法として，レーザビーム直接描画法[54]がある。

著者らは，本デバイスのような大面積の光集積回路デバイスに対応するため，レーザビーム描画装置を開発した。図4.2に装置の構成を示す。本装置は，クローズドループ制御精密Ｘ－Ｙステージ，He－Cdレーザビームの集光光学系，およびレーザ光強度変調部を組み合わせて構成されている。Ｘ－Ｙステージは0.1 μm/ステップ，ストローク 100mm×100mmで，ホストコンピュータから送られる24ビット位置信号によってデジタル制御される。ステージ移動速度は～0.08mm/secである。波長 0.442 μm He－Cdレーザビームを，ステージ上のフォトレジストを塗布した試料表面上に集光し，ステージの所定の位置で集光レーザビームを強度変調して，導波路パターンを描画する。表4.1に描画装置の仕様と性能を示す。

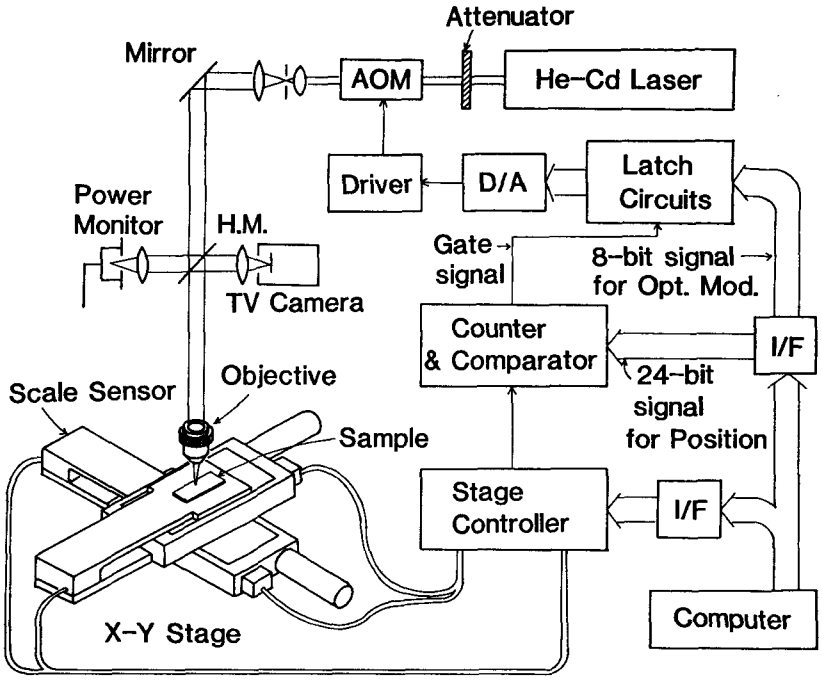


図4.2　レーザビーム描画装置の構成

表4.1　レーザビーム描画装置の仕様と性能

光　　源	He－Cdレーザ（0.442 μm）
X－Yステージ	0.1 μmステップ
位置決め精度	＜ 0.2 μm
描画時のステージ平均移動速度	0.08mm/秒
最大描画面積	100 × 100mm²
コントローラの機能	直線・曲線上の等速移動可能
光強度変調信号	8ビット並列信号
位置信号	24ビット並列信号
カウンタ・コンパレータの信号処理速度	＜1 μsec
描画できるパターン	方向性結合器，X・Y分岐，S字導波路など
描画可能な最小線幅	～0.5 μm
描画された線幅の揺らぎ	＜0.2 μm

4.3.2 描画特性

レーザビーム描画装置で方向性結合器を描画，作製して，装置の描画精度を評価した。いま，長さLの方向性結合器の2つの出力光強度をP_1，P_2とすると，結合器の光パワー伝達率ηは

$$\eta = P_2/(P_1+P_2)$$
$$= \sin^2(\kappa L+\phi) \qquad (4.1)$$

で与えられる。ただし，ϕは分岐導波路部分での結合を示す項である。この式より，$\sin^{-1}\sqrt{\eta}$をLの関数としてプロットすると，その傾きから結合係数κが求められる[55]。導波路幅 3.5μm，間隔 4.5μmのZ軸伝搬$LiNbO_3$方向性結合器の一方の導波路にアルミ膜を装荷し，アルミ膜の長さを 0.6mmづつ短くし，そのときのP_1，P_2を測定してパワー伝達率ηを計算した。実験では，結合器の入力端でTM導波モードを励起した。TM導波モードでは，金属装荷で位相不整合が生じるので，金属が装荷されていない部分の長さLを結合器の長さとみなすことができる[56]。図4.3に実験結果を示す。この場合，完

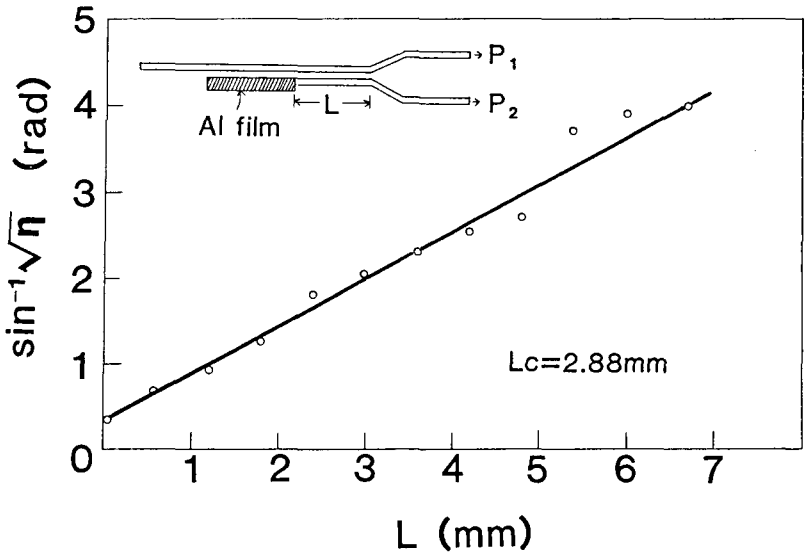


図4.3　レーザビーム描画装置で描画した方向性結合器の導波路幅，間隔の一様性の評価

全結合長L_c=2.88mmで，測定点の偏差は＜10%である。金属装荷部分の結合を無視すれば，これは＜0.2μmの導波路間隔，あるいは導波路幅の揺らぎに対応することが，等価屈折率法による計算からわかった。

このレーザビーム描画装置を用いてＬＤＶ用光集積回路デバイスの導波路をパターニングした。デバイス１個の導波路パターンの描画に要した時間は約30分である。図4.4は，本デバイスのＴｉ 拡散後のＹ分岐，交差導波路，および方向性結合器の顕微鏡写真である。Ｙ分岐導波路の分岐角は１/50rad，交差導波路の交差角は１/25rad である。幅 3μmの導波路が＜0.2μmの揺らぎで一様に作製できているのがわかる。なお，交差導波路における直進導波光パワーと結合導波光パワーの比（クロストーク）は＞20dＢ以上であった。

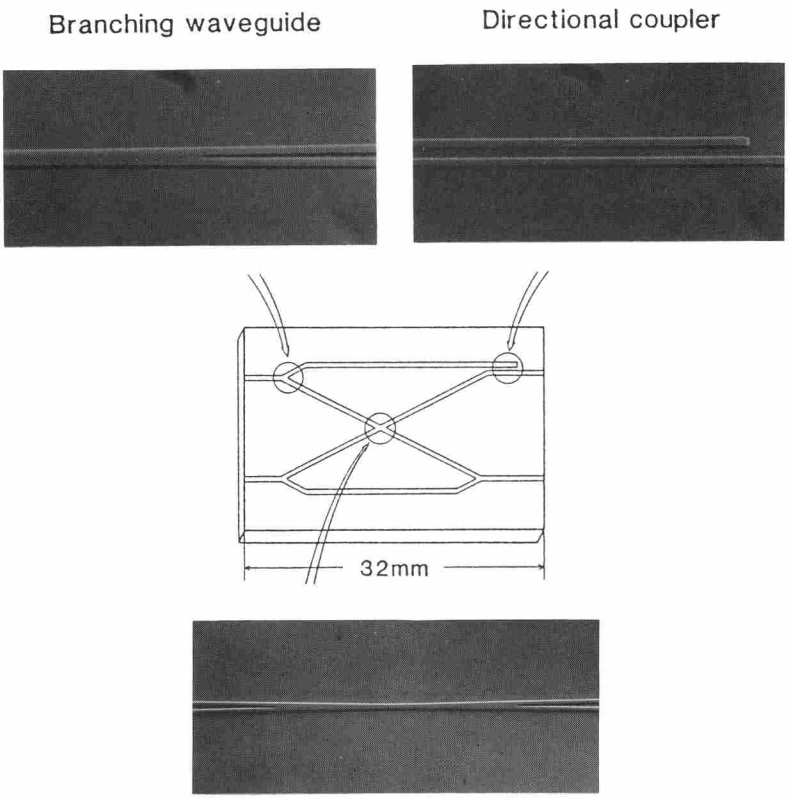
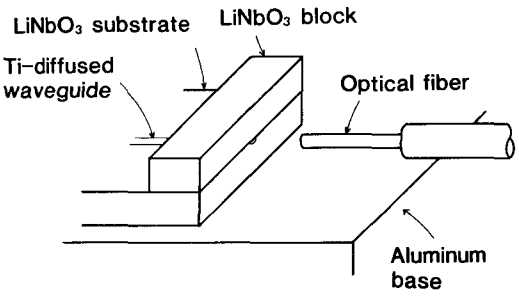


図4.4　ＬＤＶ用光集積回路デバイスのＹ分岐，方向性結合器，交差導波路の顕微鏡写真

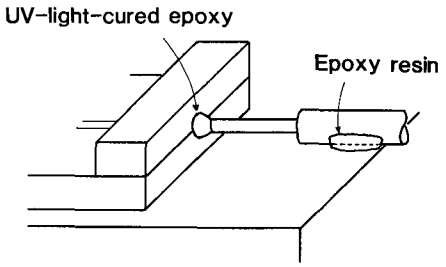
4.4 偏波保存光ファイバと導波路の結合

4.4.1 端面ブロックを用いた結合法

偏波保存光ファイバと導波路の結合には，端面ブロック装荷法[57]を用いた。この方法は，Si－V溝を用いて位置合わせを行う方法[58)-60)]に比べて，硬化時の接着材の収縮によるファイバ/導波路相互の位置ずれが少ないため，これによる結合損失の減少が期待できる。図4.5 (a) (b)に本デバイスで行った，端面ブロック装荷による導波路と偏波保存ファイバの結合法を示す。(a) のように，ファイバ接続側の基板端に，前もって準備した$LiNbO_3$の小ブロックを研磨端面を一致させてUV光硬化樹脂で接着する。導波路に光を入射し，ファイバ端面を出射導波路端面に近づけて，ファイバ出力光強度が最大となるように，ファイバの光軸，および端面の位置を調整した。最適のアラインメントが得られたとき，(b) のようにUV光硬化樹脂で両者を接着した。硬化後，機械的強度を補うために，ファイバ被覆とAl Lアングルとをエポキシ系接着材で固定した。接続した光ファイバの全長は，2.3mである。



(a) 結合前



(b) 結合固定後

図4.5 端面ブロック装荷法による偏波保存ファイバと導波路との結合

ここで，光ファイバと導波路の結合効率を計算し，相互の位置ずれ許容誤差を見積もる。ステップインデックスチャネル導波路の中心を原点にとり，基板の深さ方向をX軸，横方向をY軸とする。導波路端面とファイバ端面はZ＝0

で接しているとする。いま，導波路およびファイバを伝搬する導波モードの界分布$\phi_G(X,Y)=\phi_{GX}(X)\,\phi_{GY}(Y)$ および$\phi_F(X,Y)=\phi_{FX}(X)\,\phi_{FY}(Y)$ が与えられたとき，Z＝0における境界条件とモードの直交性から，両者のパワー結合効率ηは次式で与えられる。

$$\eta = c\cdot\frac{(\int\phi_{FX}\phi_{GX}dx)^2}{\int\phi_{FX}^2dx\int\phi_{GX}^2dx}\cdot\frac{(\int\phi_{FY}\phi_{GY}dy)^2}{\int\phi_{FY}^2dy\int\phi_{GY}^2dy}$$

$$\equiv c\ I_{XX}^2\ I_{YY}^2 \qquad (4.2)$$

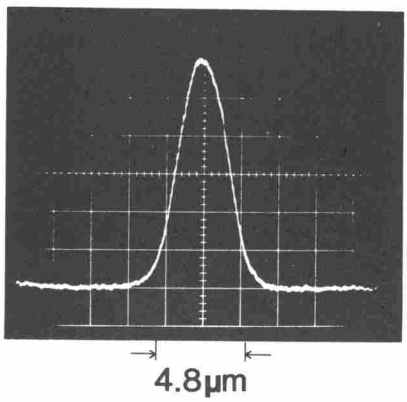
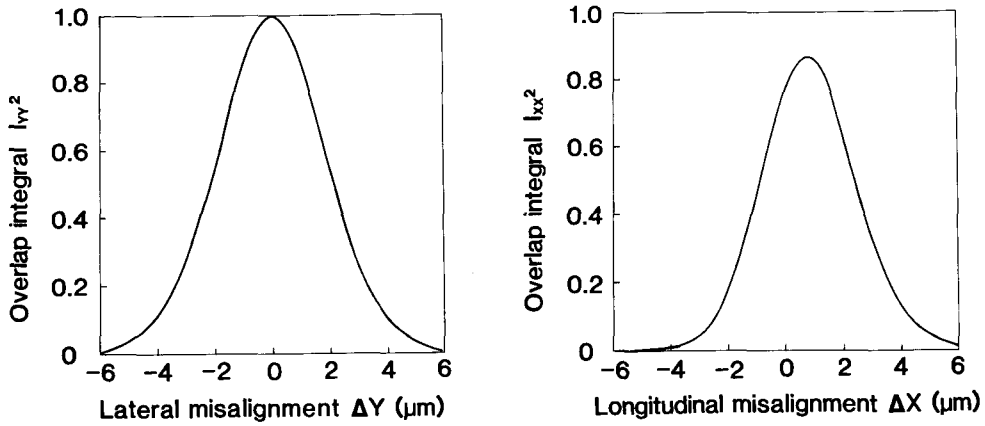


図4.6　接続した偏波保存ファイバの出射光強度分布

cは，フレネル反射に伴うパワー透過率で，両者の伝搬定数β_G，β_Fから決まる定数であり，石英系光ファイバとZ軸伝搬$LiNbO_3$導波路との場合では，c≒0.951である。図4.6は接続した偏波保存光ファイバ(日立電線楕円ジャケット，コア径 4μm）の出射光強度分布である。光強度の$1/e^2$幅は～4.8μmであった。上式をもとに，導波路とファイバの位置ずれに対する界分布の重畳積分I_{XX}^2およびI_{YY}^2の変化を計算した。界分布はステップインデックス導波路／マーカットリィの方法で近似的に求めた。図4.7に計算結果を示す。I_{YY}^2の最大値$I_{YY}^2{}_{max}$は，ΔY＝0で得られ，0.98である。一方，I_{XX}^2の最大値$I_{XX}^2{}_{max}$は，導波モードの界分布の非対称性からΔX＝0.7μmで得られ，0.83である。この結果から，作製したZ軸伝搬$LiNbO_3$導波路と偏波保存光ファイバとの結合効率の理論最大値η_{max}は78%(−1.1dB)となる。結合効率の低下を10%以内に抑えるためには，両者の位置ずれをX方向で±0.7μm，Y方向で±0.8μm以内に抑えることが必要である。



(a) 横方向ずれ　　(b) 深さ方向ずれ

図4.7　ファイバと導波路の位置ずれに対する結合効率の低下

4.4.2　結合効率の測定

結合した導波路と光ファイバの結合効率を測定した。図4.8に測定方法を示す。まず，導波路の出射光パワーをレンズを介して測定する（P_0）。P_0から，導波路端面の反射率R_G，レンズの透過率Tを考慮すると，導波路の導波光パ

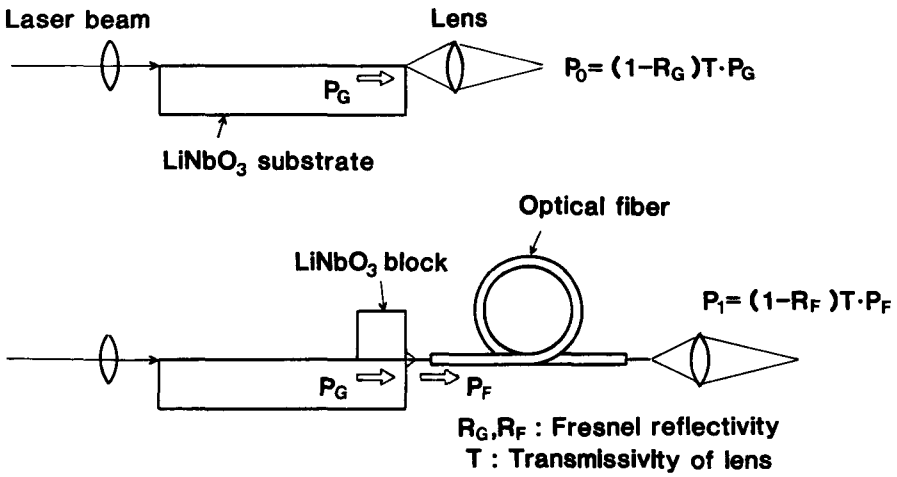


図4.8　導波路とファイバの結合効率の測定光学系

ワーP_G が計算できる。ファイバ接続後，ファイバの出射光パワーを同じレンズを介して測定する（P_I）。長さ2.3mの光ファイバの伝搬損失（~0.028dB）は結合効率に比べて無視できるので，P_Iから，ファイバ端面反射率R_F，レンズの透過率Tを考慮してファイバ導波光パワーP_F が計算できる。したがって結合効率ηは，

$$\eta = \frac{P_F}{P_G} = \frac{1-R_G}{1-R_F} \cdot \frac{P_I}{P_O} \tag{4.3}$$

となる。式(4.3) を用いて，接続した光ファイバの結合効率を計算したところ，ＴＥモードで70%，ＴＭモードで60%が得られた。両モードの結合効率の差は，これら二つの導波モードの界分布の違いによるものと考えている。しかし，ＴＥモードにおいては，４.4.1の計算結果の理論最大値に近い結合効率が得られており，端面ブロック装荷法を用いて±１μm以内の位置ずれで導波路と偏波保存ファイバとを結合・固定できたといえる。図4.９に作製したＬＤＶ用光集積回路デバイスの写真を示す。

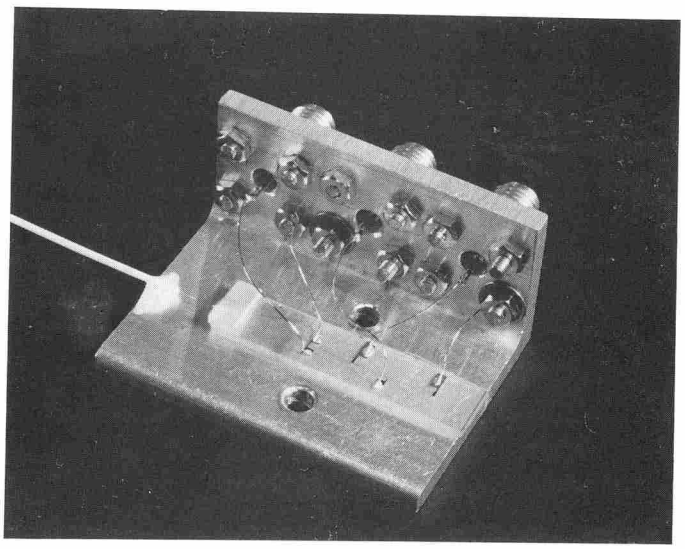


図4.９　作製したＬＤＶ用光集積回路デバイス

4.5 速度検出特性測定

4.5.1 光学実験系

試作したデバイスを用いて移動鏡の速度計測実験を行い，デバイスの速度検出特性を測定した。図4.10に光学実験系を示す。光源には波長 0.633 μmの直線偏光He－Neレーザを用い，デバイス入力端面から20倍の対物レンズでＴＥ導波モードを励起した。セロダイン形周波数シフタには，繰り返し周波数 f_R＝300ｋHz，ピークピーク値V_R ＝29Ｖののこぎり歯状電圧を印加した。モード変換素子には，位相整合用電圧V_C＝23Ｖ，モード変換用電圧V_M＝4.8Ｖを印

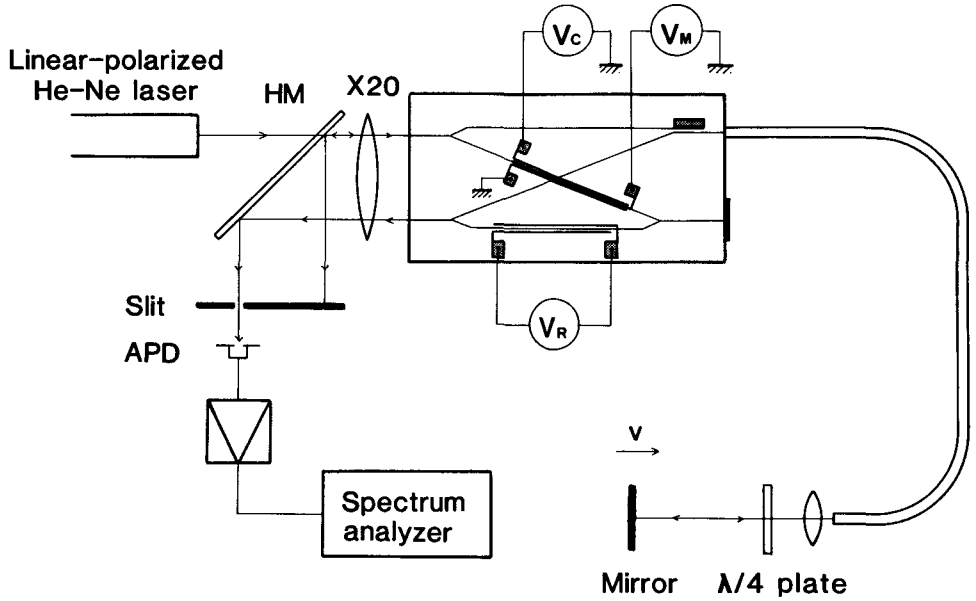


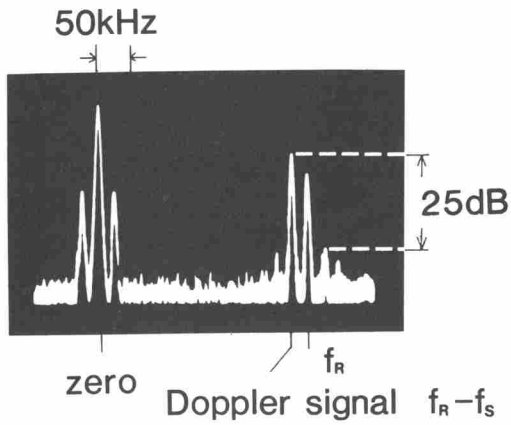
図4.10 速度検出特性の測定光学系

加した。このとき，セロダイン形周波数シフタでイメージ抑圧比－30dB，ＴＥ－ＴＭモード変換素子で変換効率≧98%である。デバイスに集積化したモードスプリッタのＭＳ比は，ＴＥモードに対して７dB，ＴＭモードに対して12dBであった。入射光パワーに対するデバイス出力光パワーの比は－33.4 dBであった。偏波保存光ファイバからの出射光を，１/4波長板を通し，対物レンズで移動鏡面上に集光した。移動鏡の速度は８mm/secである。このとき，ファイ

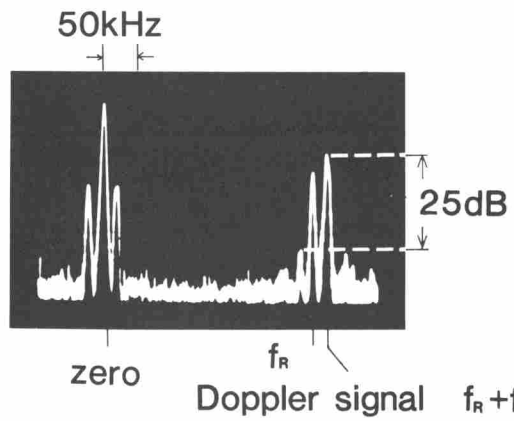
バを含めた光デバイスの出力端から移動鏡までの距離が干渉計の二つのアームの光路差となる。コヒーレンス条件を満たすために，この光路差を使用したHe－Neレーザの共振器長の偶数倍にしている。デバイスの出力光をハーフミラーHMで取り出してＡＰＤでヘテロダイン検波を行った。ＡＰＤの出力信号を増幅器に通し，その周波数スペクトルを観測した。

4.5.2　測定結果

観測した周波数スペクトルを図4.11に示す。参照導波光の周波数シフト f_R を中心として，(a) 移動鏡が近づく時には (f_R-f_S)，(b) 遠ざかる時には (f_R+f_S) のドップラビート信号が観測できる。このことから，セロダイン形周波数シフタモード変換素子，モードスプリッタが機能していることが確認できる。ここで，ドップラシフト周波数 $f_S=25\,kHz$ で，鏡の移動速度 8 mm/secに対応している。作製したデバイスでは，ファイバ端面およびファイバ／導波路結合部の無反射コーティングを施していないので，これらの面からのフレネル反射光がドップラシフト信号光と干渉して，周波数 f_S や f_R に不要の成分が生じている。そのため，速度測定範囲は周波数にして $f_R/2$ から $3f_R/2$ の間に限定され



(a) 鏡が近づくとき



(b) 鏡が遠ざかるとき

図4.11　観測した周波数スペクトル
($f_R=300\,kHz$，　$v=8$ mm/sec)

ている。実験では，f_R＝300ｋＨｚとしたので，速度測定範囲は $|v| < 47$mm/sec であるが，この範囲内において，ドップラビート信号と不要信号の振幅比（ＳＮ比）25dＢが得られた。

ＳＮ比はドップラ信号とイメージ成分との振幅比で制限されている。イメージ成分が生じる要因は，作製したデバイスで観測された２～３％の減偏光であると考えられる。これは主に，デバイス中のＹ分岐，曲がり，斜め導波路部分で発生していると考えている。周波数シフタの手前で，この減偏光により参照導波光と直交する偏光成分（ＴＥモード）が発生すると，r_{12}とr_{22}の符号 が異なっているために（$f_0 - f_R$）成分が生じる。この成分と信号光アーム内で減偏光によって発生したＴＥモード成分との干渉で，イメージ成分が生じる。

本デバイスでは，信号光路にのみ光ファイバを接続しているので，ファイバの温度変動や光源の周波数変動によって信号光位相が変動し，ドップラビート信号の周波数が変化すると考えられる。光ファイバの屈折率：ｎ，長さ：Ｌにおいて，ファイバ光路長位相$\phi = 2knL$である。温度変動によるビート周波数の変化δf_Tは，ϕを温度微分すると求められる。作製したデバイスではＬ＝2.3mで，このとき，光ファイバ全体にわたって 0.1℃/secの温度変動が生ずると，ビート信号周波数が$\delta f_T = 9.9$Ｈｚだけ変化する。これは，速度に換算すると，3.1μm/secに対応する。光源の周波数変動$\delta f/f$によるビート周波数の変化δf_Fは，ϕを周波数微分すると求められ，１秒当たり$\delta f/f = 10^{-6}$の変動が生じたとき，$\delta f_F = 10.6$Ｈｚで，速度に換算すると，3.4μm/secに対応する。また，速度測定分解能は，信号処理系の周波数分解能に依存する。実験ではスペクトルアナライザの３-dＢ帯域幅を3ｋＨｚとしたので，分解能は0.95mm/secである。速度測定分解能は，スペクトルアナライザの周波数帯域幅を狭くすることで改善することができる。

4.6 結　言

ＬＤＶ用光集積回路デバイスの作製方法，および作製したデバイスを用いて

行った速度計測実験の結果について述べた。

デバイスの導波路パターニングのためにレーザビーム描画装置を開発した。装置は，0.1 μm/ステップ，ストローク 100mm×100mmのX－Yステージ，He－Cdレーザビームの集光光学系，レーザ光強度変調部を組み合わせて構成されており，幅 3 μmの導波路パターンを位置決め精度<0.2 μmで描画することができる。

端面ブロック装荷法を用いて偏波保存光ファイバと導波路を結合し，結合効率60～70%を得た。

作製したデバイスを用いて移動鏡の速度計測実験を行い，25dBのSN比でドップラビート信号を検出した。実験では，速度測定範囲 $|v| < 47$mm/sec，測定分解能0.95mm/secであり，それぞれセロダイン形周波数シフタの印加のこぎり歯状電圧の周波数を高くし，信号処理系の周波数帯域幅を狭くすることで改善できる。

以上の結果，$LiNbO_3$ チャネル導波路を用いて，速度計測用ヘテロダイン干渉光学系を構成しえることを実証した。表4.2に作製した光集積回路デバイスの仕様・特性を示す。

表4.2　作製したＬＤＶ用光集積回路デバイスの仕様・特性

光　　源		He－Neガスレーザ（波長 0.633 μm）
光集積回路デバイス	基　　板	X板$LiNbO_3$ ：32×7 mm^2
	導　波　路	Z軸伝搬Ti 拡散導波路： 幅 3 μm，Ti 膜厚 350Å
	周波数シフタ	セロダイン形周波数シフタ：電極長 10mm，V_π =14V，f_R = 300kHz 不要サイドバンド抑圧比：－30dB
	ＴＥ－ＴＭ モード変換素子	プレーナ３電極装荷：電極長10mm V_C=23V，V_M=4.8V モード変換効率≧98%
	ＴＥ－ＴＭ モードスプリッタ	金属クラッド非対称方向性結合器： スプリッティング比：7/12dB （TE/TM）
信号ピックアップ部		偏波保存光ファイバ（コア径 4 μm）
導波路／ファイバの結合		端面ブロック装荷法： 結合効率～70%
速度検出特性		ＳＮ比　25 dB

第5章　0.8μm帯半導体レーザを用いた
レーザドップラ速度計測用光集積回路デバイス[61]

5.1 緒　　言

本章では，光源に半導体レーザを用いたＬＤＶ用光集積回路デバイスについて述べる。光源に半導体レーザを用いることによって，システム全体の小型・安定化を図ることを目的とする。さらに，光源と検出器をハイブリッドに集積化することで，光学定盤上でなくても動作するデバイスの実現が期待できる。光源には，波長 0.8μm帯のファブリペロー（ＦＰ）形半導体レーザを用いることにする。このようなＦＰ形半導体レーザは，単一モード発振の状態であっても，He－Neガスレーザと比べて発振スペクトル幅が広く，可干渉距離が短い。これは，ＦＰ形半導体レーザは，ＤＦＢ（分布帰還）形や，ＤＢＲ（分布反射）形と異なり，端面反射率が～30%と低いために，共振器のＱが小さいことに起因している。第４章までに述べたＬＤＶ用光集積回路デバイスでは，信号光と参照光との光路長差が光ファイバの長さの２倍（ファイバの屈折率を考慮すると～6.7m)以上にもなるため，このままの構成では半導体レーザを光源に用いることができないと考えられる。デバイスには，このような可干渉距離の短いレーザ光源でも，干渉ビート信号が得られるような構成が要求される。まず，光源の可干渉距離の測定を行い，この結果をもとに構成したデバイスの構成を示す。次に，半導体レーザ・検出器と光ファイバを接続するためのモジュールを設計・試作し，これを用いて所望のハイブリッド光集積回路デバイスを作製する。さらに，作製したデバイスを用いて行った速度計測実験の結果について述べる。

5.2 光源の可干渉距離の測定

ＦＰ形半導体レーザを光源にしたときの光路長差の許容範囲を求めるために，その可干渉距離を測定した。測定光学系を図5.１に示す。光路長差$\Delta L = L_s$

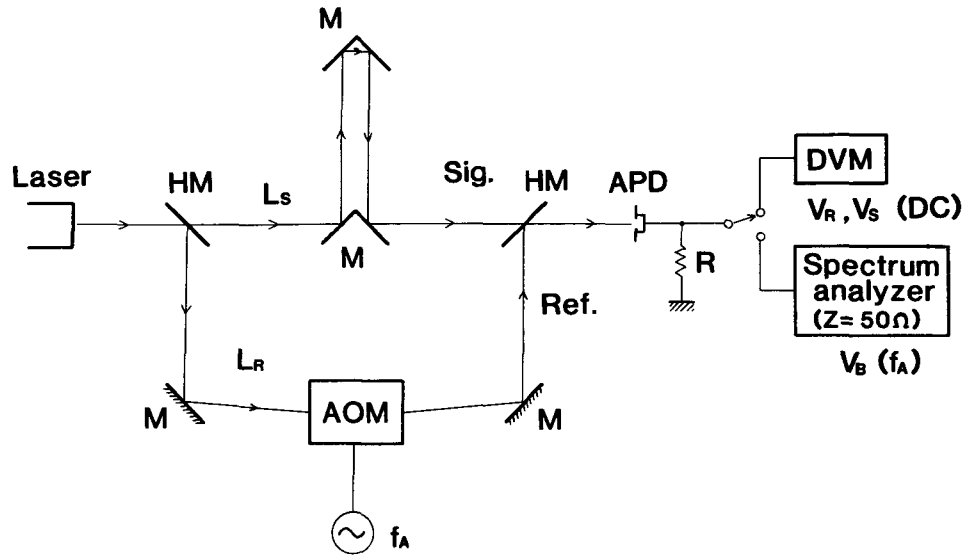


図5.1　可干渉距離の測定光学系

$-L_R$ を持つマッハーツェンダー干渉計の一方のアーム（参照光アーム）に音響光学変調器ＡＯＭを挿入して45MHz の周波数シフト f_A を与え，信号光とともにＡＰＤで検出する。まず，参照光と信号光をそれぞれ独立にＡＰＤ（負荷抵抗：R）で検出し，その出力電圧 V_R，V_S をデジタルボルトメータＤＶＭで測定した。ここで，複素コヒーレンス度[62),63)]の絶対値をコヒーレンス度と呼ぶと，V_R と V_S からコヒーレンス度が１のときに検出されるビート信号電圧 V_{BO} が次式のように求められる。

$$V_{BO} = \sqrt{2 V_R V_S} \cdot \frac{Z}{R} \qquad (5.1)$$

ただし，Ｚは測定に用いる高周波電圧計の入力インピーダンスである。次に，参照光と信号光をＡＰＤでヘテロダイン検波し，周波数 f_A の干渉ビート信号電圧 V_B をスペクトルアナライザ（入力インピーダンス：$Z=50\Omega$）を用いて測定した。V_{BO} と実測のビート信号電圧 V_B の比をとることで，コヒーレンス

度$\gamma(\Delta L)$が求められる。

$$\gamma = \frac{V_B}{V_{BO}} = \frac{V_B}{\sqrt{2 V_R V_S}} \cdot \frac{R}{Z} \qquad (5.2)$$

測定は，0.633 μm He－Neガスレーザと，0.8 μm帯ＦＰ形半導体レーザの二種類のレーザについて行った。

図5.2は，第4章までの実験に用いたHe－Neガスレーザ（Hughes：3235 H-PC）の測定結果である。このレーザは，共振器長55ｃｍで縦モード間隔

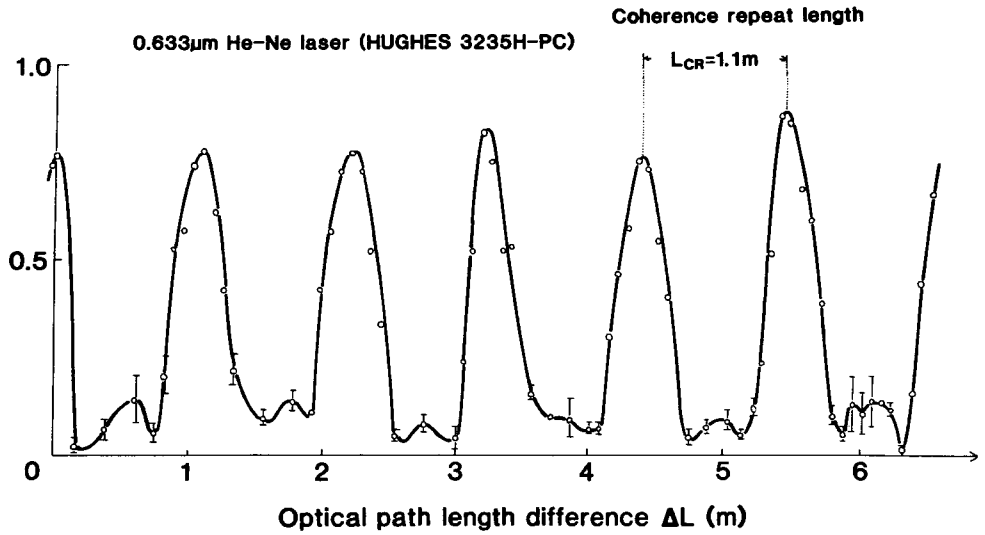


図5.2　可干渉距離の測定結果（0.63 μm He－Neレーザ）

270MHz である。コヒーレンス度$\gamma(\Delta L)$は，レーザの共振器長から決まるコヒーレンスリピート長L_{CR}＝ 1.1mを周期とする周期関数となっており，光路長差ΔLが7ｍを超えても，$\Delta L = n L_{CR}$（ｎ：整数）とすれば，光路長差がないときとほぼ等しいレベルの干渉ビート信号が得られることがわかる。図5.3は，本章のデバイスの光源に用いる0.8 μm帯ＦＰ形半導体レーザ（シャ

ープ：ＬＴ015ＭＦ，最大出力30ｍＷ）の測定結果である。先のＨｅ－Ｎｅガスレーザの場合と異なり，コヒーレンス度γ（ΔＬ）は光路長差ΔＬに対して単調に減少する関数となり，干渉ビート信号の電圧振幅はΔＬ＝１ｍで光路長差がないときの1/10に低下する。この結果から，ビート信号出力の低下を例えば３ｄＢ以内に抑えるためには，光路長差を30ｃｍ以内に抑える必要があり，７ｍ近い光路長差を持つ 0.633 μm帯ＬＤＶ用光集積回路デバイスそのままの構成では，この半導体レーザを光源に使用できないことがわかった。図5.4は，このとき分光器（波長分解能～0.05ｎｍ）で観測した半導体レーザの発振スペクトルである。注入電流I_L=69ｍＡ，出力20ｍＷで，波長 832ｎｍにおいて単一縦モード発振となっている。

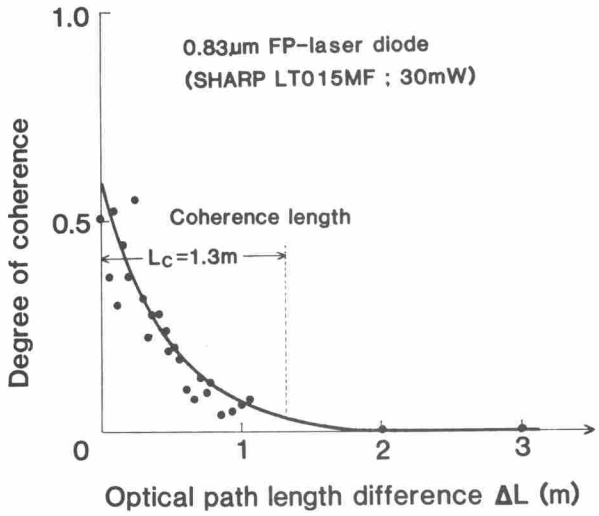


図5.3　可干渉距離の測定結果
（0.8μｍ帯ＦＰ形半導体レーザ）

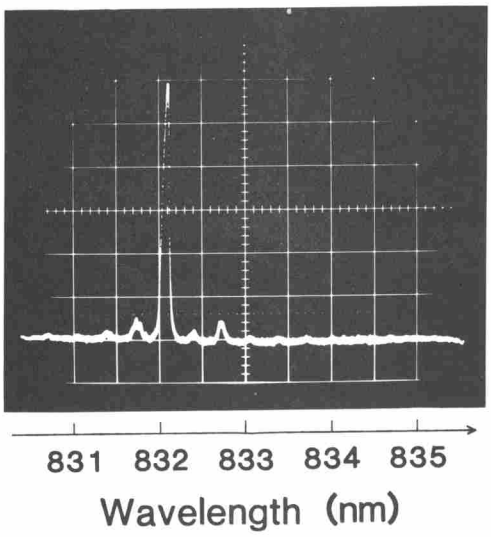


図5.4　発振スペクトル
（注入電流69ｍＡ，出力20ｍＷ）

ここで，光のパワースペクトルＰ（ω）は，コヒーレンス関数γ（Δτ）（Δτ：両アームの光源から検出器までの到達時間差）のフーリエ変換に等しい[66),67)]ので，図5.2，5.3から光源のパワースペクトル分布を知ることが

できる。測定した図5.2のHe－Neレーザの場合，4～5本の縦モードが同時に発振しており，$\gamma(\Delta L = 6\,m) > 0.9 \times \gamma(\Delta L = 0)$ から一つの縦モードの周波数拡がりの半値全幅は＜7MHz とわかる。また，図5.3の半導体レーザについては，コヒーレンス長 ～1.3m，パワースペクトルはローレンツ形に近く，その半値全幅は～230MHz とわかる。

5.3 デバイスの構成

このように干渉計の光路長差を小さくするには，デバイスの参照光路の導波路にも光ファイバを接続して，信号光の光路長と等しくすればよい。図5.5に提案した 0.8μm帯半導体レーザを用いたＬＤＶ用光集積回路デバイスの構成を示す。第4章までで述べたHe－Neレーザを用いたデバイスと基本的な構成

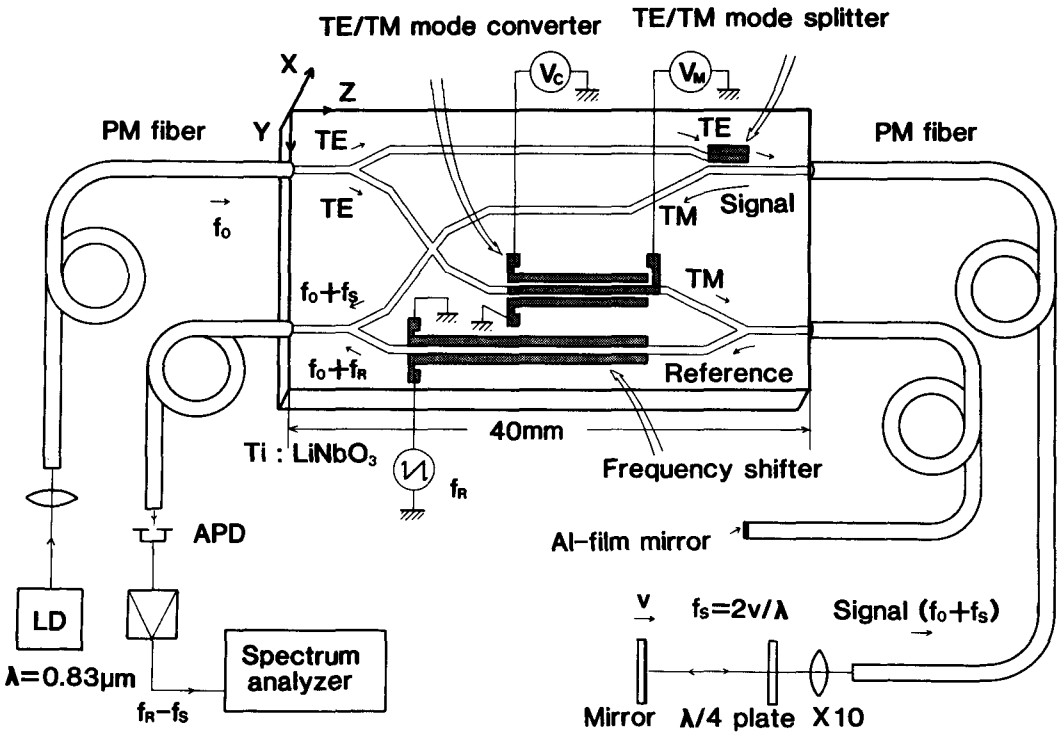


図5.5　0.8μm帯ＦＰ形半導体レーザを用いたＬＤＶ用光集積回路デバイスの構成

は同一である。Z軸伝搬$LiNbO_3$基板上に，単一モード導波形干渉計とともにセロダイン形周波数シフタ，TE－TMモード変換素子，モードスプリッタが集積化されている。He－Neレーザのものとの相違点は，信号光路に加えて参照光路にも偏波保存光ファイバを接続し，光路長差を半導体レーザの可干渉距離以下にしていることである。デバイス出射導波路間隔を偏波保存ファイバアレイのコア間隔 125 μmと一致させるため，導波路パターンを変更している。また，半導体レーザとAPDを光ファイバを介して導波路と結合させる。そのため，デバイスの両端面に偏波保存ファイバアレイが接続されることになる。

5.4 デバイスの作製

5.4.1 作製パラメータ

波長が 0.8 μm帯となるため，導波路作製条件を変更した。また，主要導波形素子についても作製パラメータを設計しなおし，個別に試作してその特性測定を行った。

(1) 導波路は，幅 5 μm，膜厚 450Åの Ti膜を，温度1000℃，加湿 Ar雰囲気中5時間，その後加湿O_2雰囲気中1時間の条件で熱拡散を行って作製した。この作製条件で，波長 0.8 μm帯において単一モード導波路となる。

(2) セロダイン形周波数シフタについては，電極間隔 6 μm，電極長20mmで半波長電圧12Vである。これに周波数500kHz，ピークピーク値V_R＝24Vなるのこぎり歯状電圧を印加したとき，最大のイメージ抑圧比＞－30dBを得た。図5.6に観測した出力光の周波数スペクトルを示す。

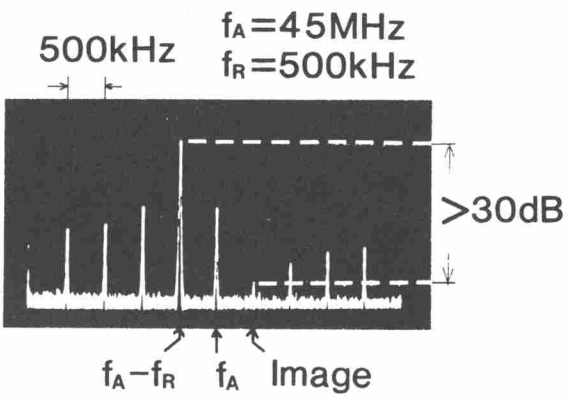


図5.6 セロダイン形周波数シフタの出力光の周波数スペクトル

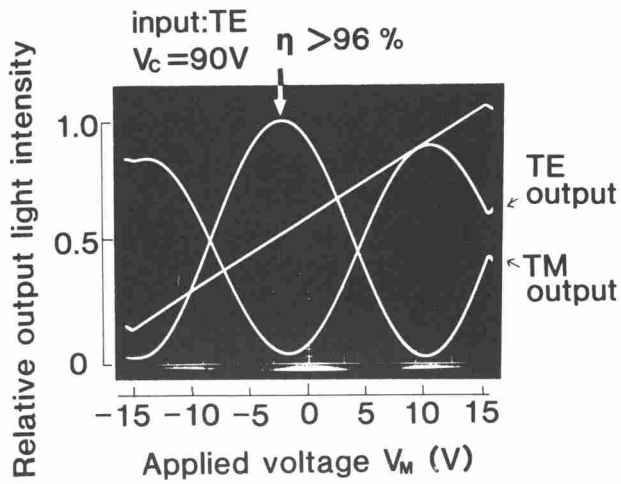


図5.7　TE－TMモード変換素子のモード変換特性

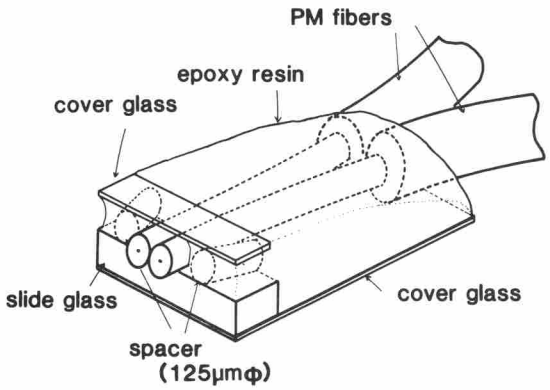
(3) TE－TMモード変換素子は，電極間隔 5 μm，電極長10mmのプレーナ3電極構造である。位相整合用電圧 V_C=90V，モード変換電圧 V_M=－2Vでモード変換効率 η >96%を得た。図5.7にモード変換特性を示す。

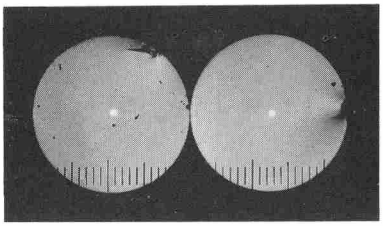
(4) TE－TMモードスプリッタは，導波路幅 5 μm と 5.3 μm，導波路中心間隔10 μm，結合器長3.7mmの金属クラッド非対称方向性結合器で，TE/TMモードにおけるモードスプリッティング比 7.6/12.0dBを得た。

各素子について，0.633 μm He－Neレーザ用のものとほぼ同等の特性が得られた。この結果をもとに，0.8 μm帯半導体レーザを用いたLDV用光集積回路デバイスを作製した。導波路パターニングには，レーザビーム描画装置を用いた。Ti拡散後，導波路端面の光学研磨を行った。デバイス全長は40mmである。SiO_2バッファ層堆積，Al 電極装荷を行った後，導波路と偏波保存ファイバアレイを接続する。

5.4.2　偏波保存ファイバアレイと導波路の結合

デバイスの出射導波路に2本の偏波保存ファイバを接続するために，まず偏波保存ファイバを密着・固定したファイバアレイを作製する。図5.8にファイバアレイの作製方法を示す。図5.8 (a) のように，125 μm径のスペーサをはさんでカバーガラスとスライドガラスを貼り合わせ，間隙に偏波保存ファイバを挿入した。二本のファイバを密着させ，顕微鏡で端面を観察して面合わせを





(a) 作製方法　　(b) 端面の顕微鏡写真

図5.8　偏波保存ファイバアレイ

行った。二つのファイバの光軸，コア間隔，偏光軸を調整した後，全体をエポキシ系接着材で硬化させた。硬化後，幅4mmに切断してファイバアレイを作製した。図5.8(b)に作製したファイバアレイ端面の顕微鏡写真を示す。実測したクラッド径は126μm，コア間隔は127μmであった。このファイバアレイを端面ブロック装荷法によって導波路と接続した。両ファイバの出射光強度をモニタしながら，ファイバと導波路の位置合わせを行い，ＵＶ光硬化樹脂で接着・硬化した。硬化後のファイバと導波路との結合効率は～60%が得られた。1本のファイバを接続した場合の結合効率～70%より低下しているのは，ファイバのコア間隔と導波路間隔との差異（～2μm）によるためである。

5.4.3　半導体レーザ・検出器と光ファイバの一体化

図5.9に半導体レーザと偏波保存ファイバとの結合法を示す。半導体レーザの出射光をレンズでガラス面上に集光させる。ガラス製のキャピラリに通した偏波保存ファイバをレーザの集光位置に近づけ，集光スポットとコアとを位置合わせした後，ＵＶ光硬化樹脂で固定した。レンズの開口数は0.15で，ファイバへの結合効率20%が得られた。

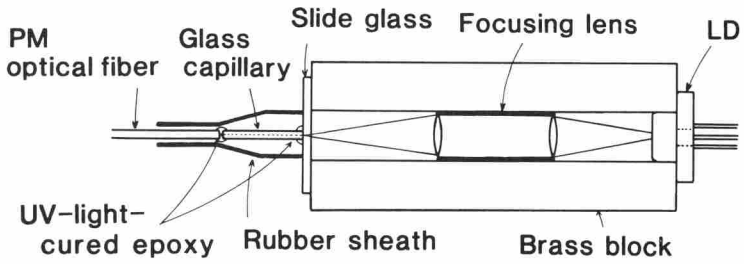


図5.9　半導体レーザと偏波保存ファイバとの結合法

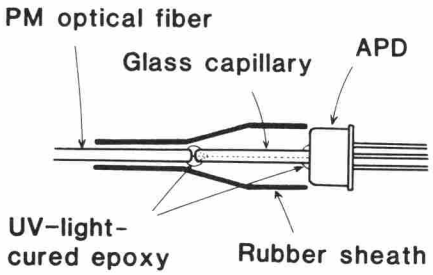


図5.10　ＡＰＤと偏波保存ファイバとの結合法

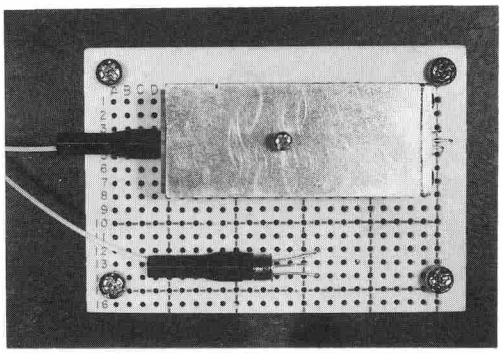


図5.11　結合した半導体レーザ，ＡＰＤと偏波保存ファイバ

図5.10にＡＰＤと偏波保存ファイバとの結合法を示す。ガラスキャピラリに通した偏波保存ファイバの出射端面をＡＰＤ受光窓に直接接着した。偏波保存ファイバの開口数，ファイバからＡＰＤの受光面(0.2mm φ）までの距離(～0.7mm）を考慮すると，レンズを用いない端面直接結合でファイバからの光をほぼ 100%ＡＰＤ受光面に取り込むことができる。図5.11は結合した半導体レーザ，ＡＰＤと偏波保存ファイバの写真である。図5.12に作製したデバイスの写真を示す。デバイス両端面に偏波保存ファイバアレイが接続されている。

5.5　速度検出特性測定

まず，試作したデバイスの挿入損失を測定した。半導体レーザの出射光を光

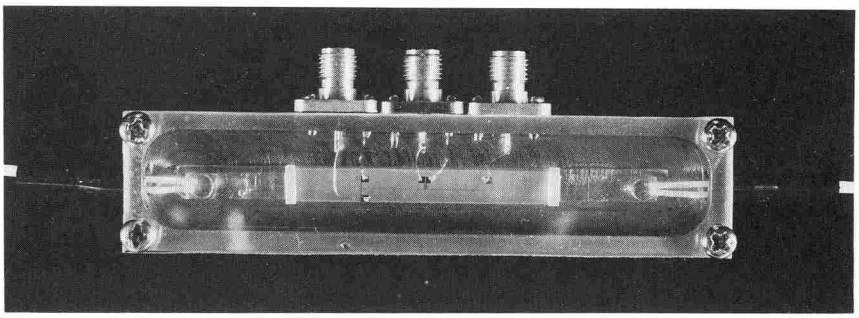
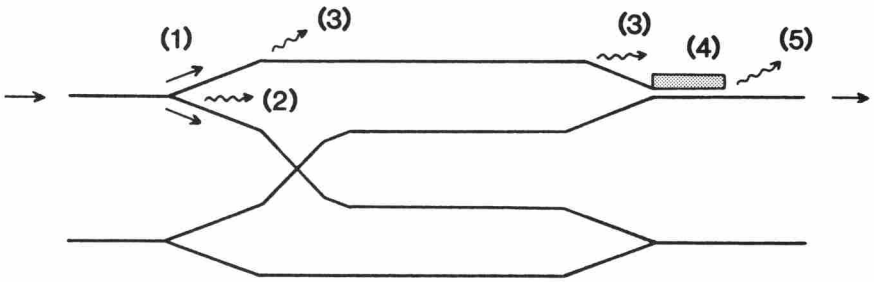


図5.12　作製した0.8 μm帯半導体レーザを用いたＬＤＶ用光集積回路デバイス

ファイバを介してＴＥ導波光を励起した。このとき，デバイスのファイバーファイバ間挿入損失（入力光ファイバ導波パワーと信号光ファイバ導波パワーの比）は 14dＢであった。表5.１に挿入損失の内訳を示す。参照光と信号光に等分配

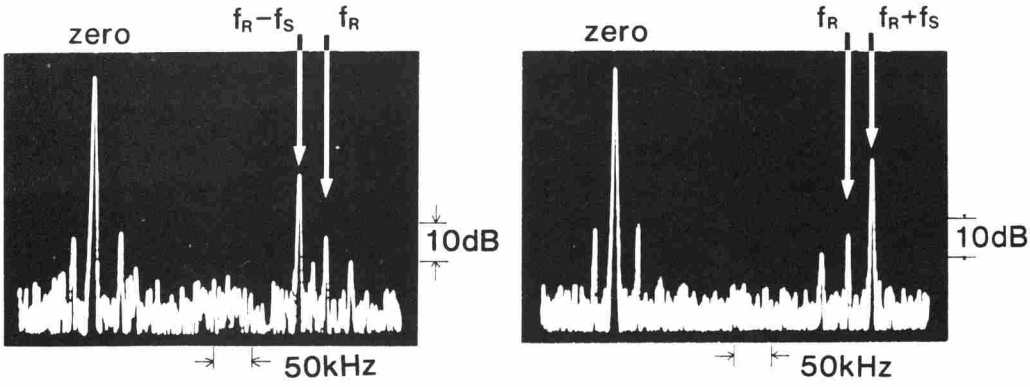
表5.１　作製したデバイスのファイバーファイバ間挿入損失の内訳

40mm長直線導波路伝搬損失	2.0dＢ（推定）
ＬＤＶ導波路過剰損失	8.0dＢ（実測）
(1)Ｙ分岐導波路 (2)分岐点での放射損失 (3)曲がり導波路の放射損失×２ (4)Ａl クラッドによる吸収損失 (5)モードスプリッタ分岐損失	3.0dＢ（等分配） 1.0dＢ（実測） 1.8dＢ（推定） 1.0dＢ（推定） 1.2dＢ（実測）
ファイバ結合損失　×２	4.0dＢ（実測）
合　　計	14 dＢ（実測）



するための3dBの損失を除く（11dB）と，ＬＤＶ用導波路の過剰損失（５dB）と，導波路とファイバの接続点における損失（４dB）で全損失の82%を占めている。挿入損失をさらに低減するためには，分岐点・曲がり・モードスプリッタの低損失化や，導波路とファイバの高効率結合（両者の界分布を一致させる，等）が必要である。

図5.5にデバイスの構成とともに，移動鏡の速度計測のための光学実験系も示している。試作したデバイスでは，半導体レーザと光ファイバの結合は行っていない。セロダイン形周波数シフタに，繰り返し周波数 f_R＝300ｋHz，ピークピーク値24Ｖののこぎり歯状電圧を印加した。ＴＥ－ＴＭモード変換素子には，位相整合用電圧V_c＝90Ｖ，モード変換電圧V_M＝－２Ｖを印加した。デバイスに集積化したモードスプリッタのＭＳ比は，ＴＥモードで4.8dB，ＴＭモードで 14.0dBであった。ＴＥモードのＭＳ比が小さいのは，方向性結合器の導波路幅の非対称性が最適値からずれたためと考えている。偏波保存光ファイバの出射光を１/4波長板を通して対物レンズで移動鏡面上に集光した。鏡の移動速度は15mm/secである。ＡＰＤ出力信号を増幅器に通し，その周波数スペクトルを観測した。観測した周波数スペクトルを図5.13に示す。He－Ne



(a) 鏡が近づくとき　　(b) 鏡が遠ざかるとき

図5.13　観測した周波数スペクトル（f_R＝300ｋHz，ｖ＝15mm/sec）

レーザのものと同じように，参照導波光の周波数シフトf_R を中心として，(a)移動鏡が近づく時には（$f_R - f_S$），(b)遠ざかる時には（$f_R + f_S$）のドップラビート信号が観測された。ここで，ドップラシフト周波数 f_S＝36ｋHzで，鏡の移動速度15mm/sec に対応している。速度測定範囲内においてHe－Neレーザの場合と同等の 25dBのSN比でドップラビート信号を検出できた。この結果，ＦＰ形半導体レーザのような可干渉距離の短い光源を用いても，デバイスの光路長差を光源の可干渉距離よりも短い構成とすることで干渉ビート信号が検出できることを確認した。表5.2に作製した 0.8μm帯半導体レーザを用いたＬＤＶ用光集積回路デバイスの仕様・特性を示す。

表5.2　作製した 0.8μm帯半導体レーザを用いた
ＬＤＶ用光集回路デバイスの仕様・特性

光　　源		0.8μm帯ＦＰ形半導体レーザ
光集積回路デバイス	基　　板	X板$LiNbO_3$ ：40×7 mm^2
	導　波　路	Z軸伝搬Ti 拡散導波路： 幅 5μm，Ti 膜厚 450Å
	周波数シフタ	セロダイン形周波数シフタ：電極長 20mm，V_π ＝12V，f_R＝300ｋHz 不要サイドバンド抑圧比＞－30dB
	ＴＥ－ＴＭ モード変換素子	プレーナ３電極装荷：電極長10mm V_C＝90V，V_M＝－２V モード変換効率＞96%
	ＴＥ－ＴＭ モードスプリッタ	金属クラッド非対称方向性結合器： スプリッティング比：4.8/14.0dB （TE/TM）
信号ピックアップ部		偏波保存光ファイバ（コア径 5μm）
導波路／ファイバの接続		端面ブロック装荷法： 結合効率～60%
速度検出特性		ＳＮ比　25 dB

5.6 結　言

波長 0.8 μm帯ＦＰ形半導体レーザを用いたＬＤＶ用光集積回路デバイスについて述べた。

光源に用いる 0.8 μm帯ＦＰ形半導体レーザ（出力30mW）の可干渉距離の測定を行い，ビート信号レベルの低下を 3 dB以内に抑えるためには，信号光と参照光の光路長差を30ｃｍ以内に抑える必要があることがわかった。

この結果をもとに，0.8 μm帯半導体レーザを用いたＬＤＶ用光集積回路デバイスの構成を提案した。デバイス出射導波路に偏波保存ファイバを２本接続し，信号光と参照光の光路長差を光源の可干渉距離以下にしている。

半導体レーザ・検出器と偏波保存ファイバの一体化を試みた。半導体レーザについては，レンズを介して偏波保存ファイバと結合し，結合効率20%を得た。検出器については，端面直接結合法で偏波保存ファイバと結合した。

試作したデバイスを用いて移動鏡の速度計測を行い，半導体レーザを光源とした場合にも，He－Neレーザの場合と同等の 25dBのＳＮ比でドップラビート信号を検出できることを示した。この結果，光源，検出器までハイブリッド集積化することで，光学定盤が不要な速度計測用光集積回路デバイス実現の見通しを得た。

第６章　時分割２次元速度計測用光集積回路デバイス[66),67)]

６.１　緒　　言

前章までに述べた光集積回路デバイスは，バルク光学部品によって構成された速度計と本質的には同じ機能・性能を有するものである。さらに，波長分波/合波，高速変調/光スイッチングといった光集積回路本来の特長を活かせば，バルク光学部品では実現できない機能を持つ計測用光集積回路デバイスを実現することが期待できる。本章では，Ｚ軸伝搬$LiNbO_3$基板上に，新たにヘテロダイン干渉計に加えて高速の導波形光スイッチを集積化した時分割２次元速度計測用光集積回路デバイスを提案する。これまで，バルク部品構成の２次元ＬＤＶとしては，偏光分割[68)]，色分割[69)]，時分割方式[70)]が提案されている。この中でも，時分割方式は，一組の検出器と信号処理系で２次元速度計測が行えるため，システムを小型化できるという特長を持っている。しかし，スイッチとして用いる電気光学変調器のスイッチング速度に制限があることや，その駆動に数ｋＶもの高電圧が必要である等の難点がある。これに対して，本デバイスは，導波形光スイッチの二つの出力導波路に２本の単一モードファイバを接続して，時分割で移動物体の２次元速度計測を行うものである。導波形光スイッチを用いることにより，10Ｖ程度の低駆動電圧で高速（＜数ＧＨz)のスイッチングが可能となる。デバイスの光スイッチには，より低電圧駆動が可能なバランスブリッジ形光スイッチ[71),72)]を用いることにする。まずはじめに，提案したデバイスの構成，および時分割多重による２次元速度計測の原理について述べる。次に，バランスブリッジ形光スイッチの動作原理および実験結果について述べる。さらに，作製したデバイスの２次元速度検出特性について述べる。

６.２　デバイスの構成

図6.１に提案した時分割２次元速度計測用光集積回路デバイスの構成を示す。

Z軸伝搬$LiNbO_3$基板上に，導波形干渉計，セロダイン形周波数シフタに加えて，バランスブリッジ形光スイッチが集積化されている。デバイスの全長は～28mmである。本デバイスでは偏光制御は行わず，信号光ピックアップ用として，２本の単一モード光ファイバが接続される。XおよびY方向の速度成分を検出するために，ファイバ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，二つのファイバ出力光が任意の角度で交差しても２次元速度計測は可能である。周波数 f_0 の入力導波光は，まず３-dBカップラで等分配される。下の導波路に導かれた光は反射形周波数シフタを通過し，端面のAl蒸着ミラーで反射されて，再び３-dBカップラに戻り，周波数（f_0+f_R）の参照光となる。もう一方の光は，時分割で２次元速度計測を行うために，バランスブリッジ形光スイッチで光路が振り分けられ，単一モードファイバを通して移動物体上に集光される。ここで，バランスブリッジ形光スイッチは，ス

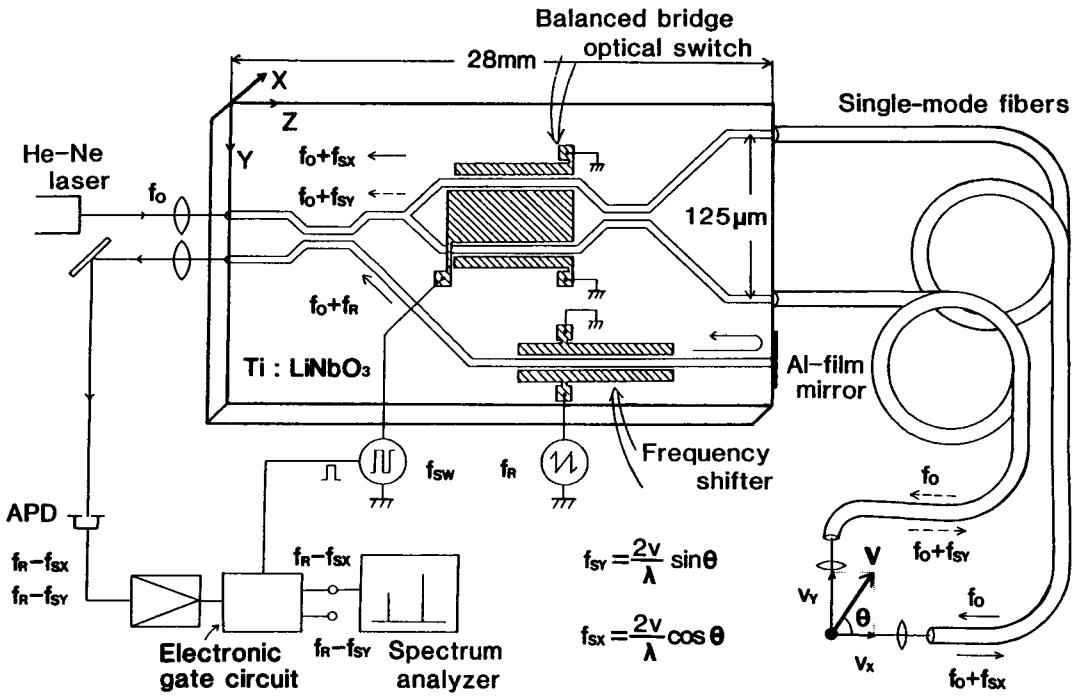


図6.1　提案した時分割２次元速度計測用光集積回路デバイス

イッチング周波数f_{SW}（$>> f_R - f_{SX,Y}$）の方形波電圧で駆動される。物体の速度v_Xおよびv_Yに対応するドップラシフトf_{SX}，およびf_{SY}を受けた反射光は，ファイバおよび光スイッチを経て入力部の3-dBカップラに戻り，信号光となる。この点で信号光と参照光が合波・干渉し，ＡＰＤでヘテロダイン検波を行う。ＡＰＤ出力信号には，二つの速度成分に対応するドップラビート信号$(f_R - f_{SX})$，および$(f_R - f_{SY})$が時分割多重化されている。これを復調するために，ＡＰＤの後段にスイッチングゲートを挿入し，光スイッチに同期してこのゲートを駆動すると，$(f_R - f_{SX})$，または$(f_R - f_{SY})$のいずれかのドップラビート信号を選択的に検出することができる。

6.3 時分割多重による2次元速度計測の原理

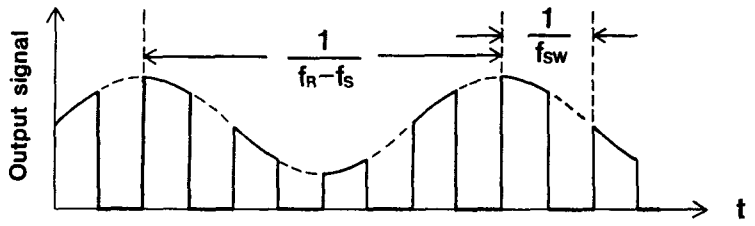
図6.2(a)にスイッチングゲートを通過した後のＡＰＤ出力信号の波形$I(t)$を示す。図では，ドップラシフト周波数をf_Sとしている。スイッチングゲートを通過した信号は，$f_{SW} >> (f_R - f_S)$より，周波数$(f_R - f_S)$のドップラビート信号が，周波数f_{SW}でスイッチングされた波形となっている。

$$I(t) = \begin{cases} I_{DC} + I_{AC} \sin(2\pi (f_R - f_S) t) & m/2f_{SW} < t < (m+1)/2f_{SW} \\ 0 & (m+1)/2f_{SW} < t < (m+2)/2f_{SW} \end{cases} \quad (6.1)$$

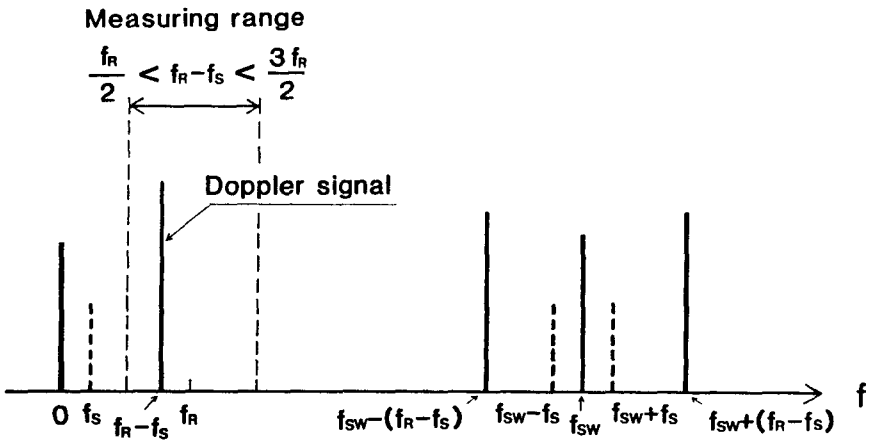
ただし，mは整数である。この波形の周波数スペクトル$I(f)$は，式(6.1)をフーリエ変換することで求められる。いま，正の周波数領域だけを考えると，

$$I(f) \propto \left[I_{DC}(f) + I_{AC}\,\delta(f - (f_R - f_S)) \right] * \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin\frac{n\pi}{2}}{n\pi}\,\delta(f - n f_{SW})$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin\frac{n\pi}{2}}{n\pi} \left[I_{DC}\,\delta(f - n f_{SW}) + I_{AC}\,\delta(f - n f_{SW} - (f_R - f_S)) \right] \quad (6.2)$$



(a)



(b)

図6.2　スイッチングゲート通過後の (a) ＡＰＤ出力信号波形
(b) その周波数スペクトル

となる。図6.2 (b) にＡＰＤ出力信号の周波数スペクトルの絶対値を示した。($f_R - f_S$) 成分が所望のドップラビート信号であり，この周波数を測定することで移動物体の速度を計測することができる。しかし，このスペクトルの中には，所望のドップラビート信号とともに，スイッチングに伴って発生する不要な周波数成分が f_{SW}の周辺に含まれる。時分割で２次元速度計測を行うためには，ドップラビート周波数の測定範囲 ($f_R/2 < f_R - f_S < 3f_R/2$) 内に，これら不要の周波数成分が存在しないようにスイッチング周波数 f_{SW}を決定する必要がある。すなわち，$f_R - f_S = 3f_R/2$のとき，不要成分のうち最も周波数の低い

$f_{SW}-(f_R-f_S)$ が，ドップラビート周波数(f_R-f_S)より高いことが必要である。この条件を求めると，$f_{SW}>3f_R$ となる。

また，時分割計測を行うためには，ファイバによる信号光の遅延時間の影響も考慮する必要がある。図6.3に (a)光スイッチの印加電圧，(b)光スイッチの一方の出力導波路からの光パルス，(c)ドップラシフトを受け，ファイバを通って再びスイッチ出力端に戻る光パルス，および (d)光スイッチを通過して入力部の3-dBカップラに到達する光パルスを示す。ここで，τはファイバ中における信号光の遅延時間で，ℓ，nをファイバの長さおよび屈折率とすると，$\tau=2n\ell/c$である。(d)に示すように，遅延時間τに応じて入力部の3-dBカップラに到達する信号光パルス幅が減少する。$\tau=1/4f_{SW}$のとき，入力3-dBカップラに到達する信号光パルス幅は半分となり，時間平均すれば，ビー

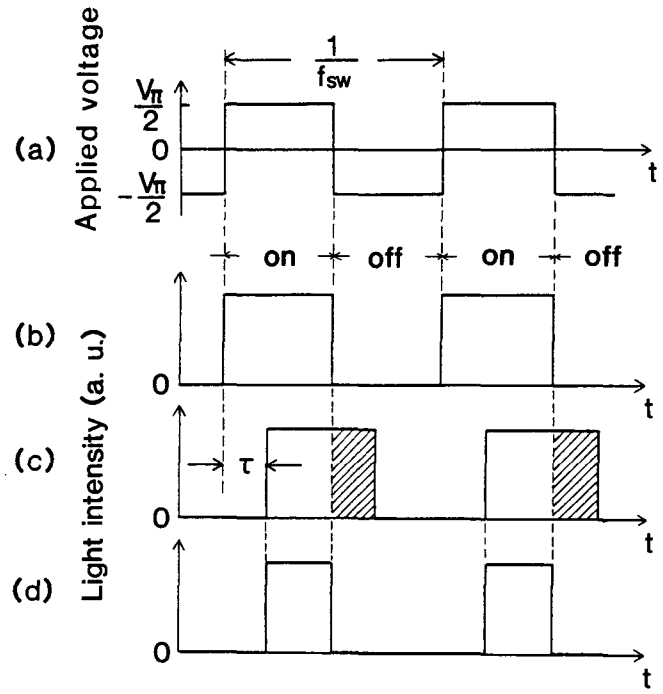


図6.3　ファイバによる信号光の遅延時間τの影響 (a)光スイッチの印加電圧 (b)光スイッチの一方の出力導波路からの光パルス (c)再びスイッチ出力端に戻る光パルス (d)入力3-dBカップラに到達する光パルス

ト信号レベルが3dB低下することになる。例えば，ファイバ長ℓ＝2mとすると，f_{SW}<12.8MHz で，信号レベル低下は3-dB以内となる。

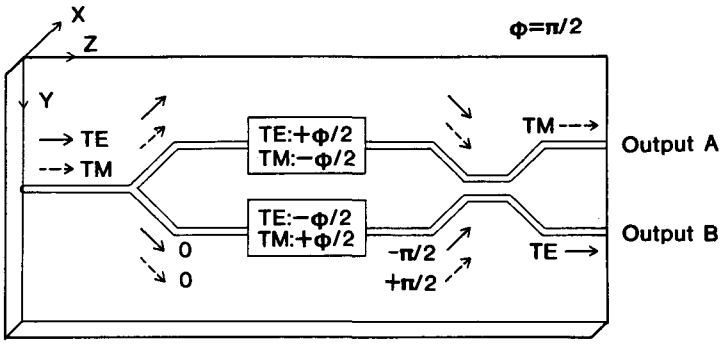
結局，図6.1のデバイスで時分割2次元速度計測を行うために必要な光スイッチのスイッチング周波数f_{SW}の範囲は，$3f_R < f_{SW} < 1/4\tau$となる。ただし，ファイバ長ℓを，その遅延時間τが$1/f_{SW}$の整数倍となるように設定すれば，信号光パルス幅の減少がなくなるため，スイッチング周波数の上限を取り除くことができる。このとき，スイッチング周波数 f_{SW}は，光スイッチの電極間容量で決まる周波数帯域（作製したデバイスでは～0.8GHz)まで高くすることができる。

6.4 バランスブリッジ形光スイッチ

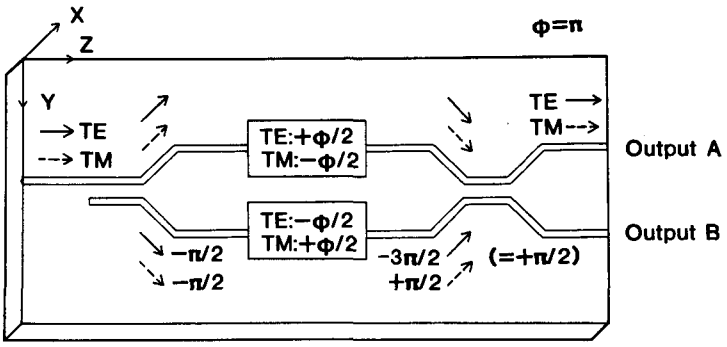
6.4.1 構造と動作原理

バランスブリッジ形光スイッチは，位相変調素子を二つの光パワー分割素子で橋渡ししたものである。Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路では，TEとTMモードがほぼ縮退しており，かつ電気光学定数 r_{22}とr_{12}（$=-r_{22}$）を通して，印加電圧により両モードは等量・逆符号の位相変化を受ける。この特性を利用すれば，Z軸伝搬$LiNbO_3$を基板としたバランスブリッジ形光スイッチでは，その構成の違いによって，偏光特性の異なる光スイッチを得ることができる。

図6.4 (a) (b)に2種類のバランスブリッジ形光スイッチの構成を示す。出力部のパワー分割素子は，共に3-dBカップラが用いられているが，入力部のパワー分割素子は，一方がY分岐導波路（図6.4 (a)），他方が3-dB方向性結合器（図6.4 (b)）になっている。この本質的な相違点は，Y分岐導波路では分割された光波が同位相であるのに対して，3-dB方向性結合器では，分割された光波に$\pi/2$の位相差が生ずることにある。図6.4には，この事を考慮して，下のアームの導波光の位相を，上のアームの導波光の位相を基準として示してある。ここで，位相変調素子はTE・TMモードに対して，共にプッシュプルに動作し，これらに互いに逆符号の位相変化$\pm\Phi/2$を与える。図6.4 (a)は$\Phi=$



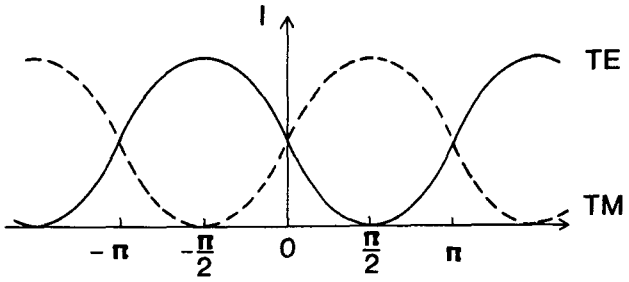
(a) 偏光分離形



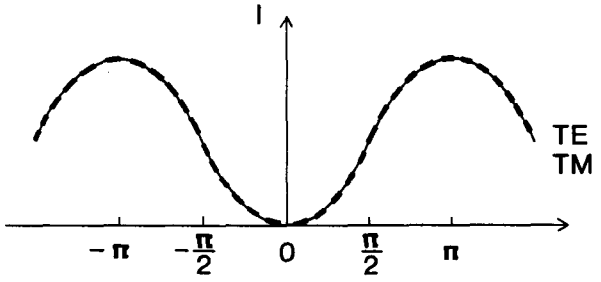
(b) 偏光無依存形

図6.4　Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路によるバランスブリッジ形光スイッチ

π/2，図6.4(b)はΦ＝πの場合を示してある。図6.4(a)の構成の光スイッチではΦ＝π/2のとき，TE・TMモードはそれぞれ導波路A・Bに分離して出力される偏光分離形として動作する。これに対して図6.4(b)の構成の光スイッチでは，出力側の 3-dB方向性結合器の直前で両アームの光波の位相差がTE・TM共にπ/2であり，遅相の導波路に全ての光パワーが移行する。すなわち，TE，TMモードとも導波路Aから出力される偏光無依存形光スイッチとして動作する。図6.5に位相変調素子の位相シフトΦに対する導波路Aの出力光強度の関係を示す。図6.4(a)および(b)の構成の光スイッチが，それぞれ偏光分離形スイッチ，偏光無依存形スイッチとして動作することを示している。



(a) 偏光分離形



(b) 偏光無依存形

図6.5　バランスブリッジ形光スイッチの変調器の位相シフトΦに対する導波路Aの出力光強度の関係

実際のバランスブリッジ形光スイッチでは，作製したY分岐導波路パターンの非対称性や両アームの導波路幅の差などによって，二つのアームの導波光の間に位相差が生ずる。また，TE・TM導波モードの界分布が異なっているので，両モードの半波長電圧V_πはわずかに異なっている。Z軸伝搬$LiNbO_3$バランスブリッジ形光スイッチを偏光分離，あるいは偏光無依存光スイッチとして用いるときには，これらの点を考慮して光スイッチを作製する必要がある。

6.4.2　特性測定

実際のデバイスに集積化する図6.4(a)の偏光分離形光スイッチを作製し，そのスイッチング特性を測定した。作製した光スイッチの構造を図6.6に示す。導波路幅 3 μm，3-dB方向性結合器の導波路間隔 4 μm，長さ 0.6mm，Y分岐導波路の分岐角 1/50rad，電極長10mm，電極間隔 6 μmである。光源に波長 0.633 μmのHe－Neレーザを使用し，端面からTE導波光を励起した。位相変調素子に繰り返し周波数1MHz の方形波電圧と直流バイアス電圧を重畳して印加し，出力光の消光比が最大となるように調整して，A・B両導波路の出力光強度 $I_A \cdot I_B$ の変化を観測した。図6.7に，観測結果を示す。この

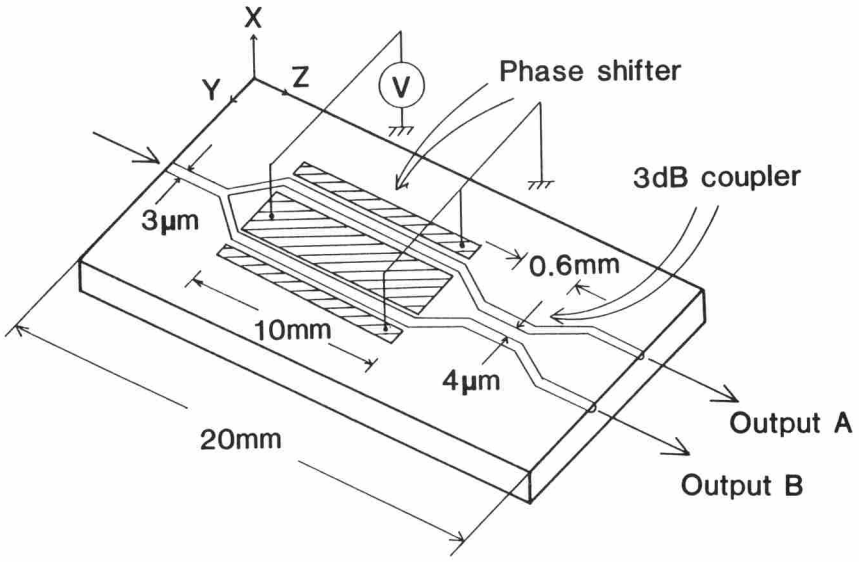


図6.6　作製したバランスブリッジ形光スイッチの構造

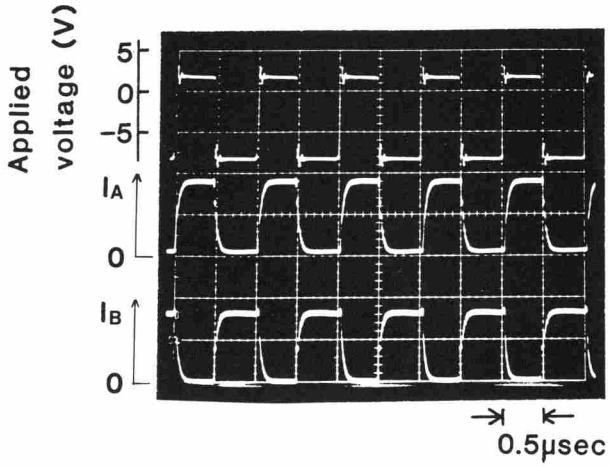


図6.7　1MHz におけるスイッチング特性

とき，印加方形波電圧のピークピーク値10Vで，20dBの消光比が得られた。

6.5　作製パラメータ

レーザビーム描画装置により，2次元速度計測用光集積回路デバイスの導波

路パターニングを行った。導波路幅は 3 μmである。現像後，320ÅのTiスパッタ膜を堆積・リフトオフし，熱拡散して導波路を作製した。両端面研磨後，プラズマCVD法により1000Å厚のSiO_2バッファ層を堆積し，フォトリソグラフィ法でアルミ電極を装荷した。電極長は，光スイッチで10mm，セロダイン形周波数シフタで12mm，電極間隔は共に 6 μmである。セロダイン形周波数シフタ（反射形）の半波長電圧V_πは 7.5Vであった。参照光用導波路端面に Al蒸着ミラーを作製した。端面蒸着後，光スイッチの出力導波路に2本の単一モードファイバを接続した。ファイバと導波路の結合効率は～50%である。図6.8に作製したデバイスを示す。

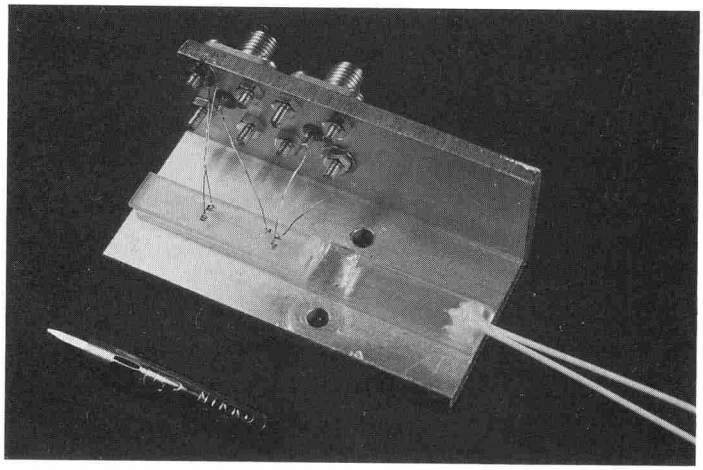


図6.8　作製した2次元速度計測用光集積回路デバイス

6.6　2次元速度検出特性測定

6.6.1　光学実験系

デバイスの入力端面からTE導波モードを励起し，移動鏡の2次元速度計測を行った。図6.9に光学実験系を示す。モータ駆動ステージ上に，互いに直交する2枚の鏡を固定し，単一モードファイバからの出射光をレンズで鏡面上に集光した。鏡の移動速度は～27mm/secである。ファイバ長はℓ = 2.3mであ

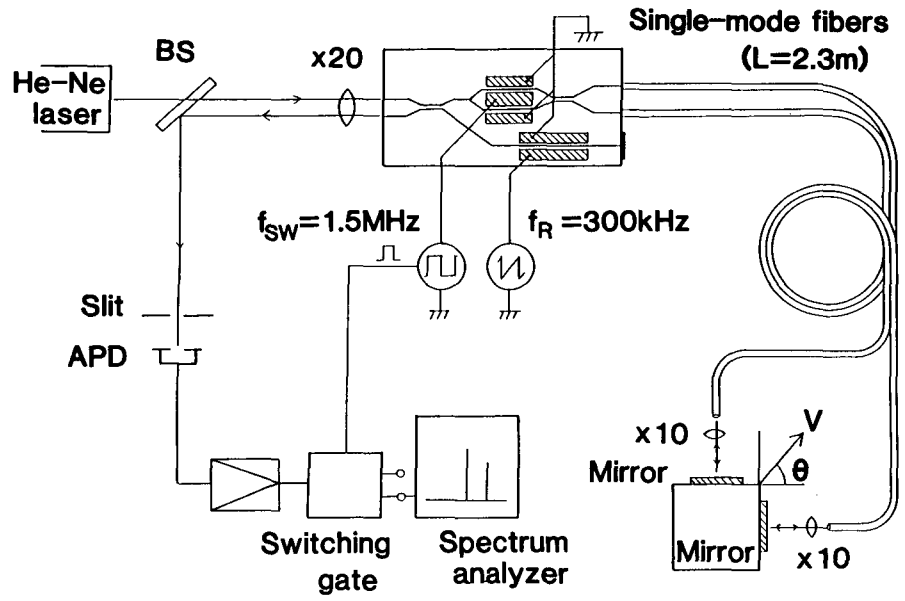


図6.9　2次元速度検出特性の測定光学系

り，これによる信号光の遅延時間τは22ns である。測定中，光ファイバの曲率半径を30cm以上として，単一モードファイバ中での偏光面の回転を無視できる程度に抑えた。セロダイン形周波数シフタには，繰り返し周波数f_R=300kHz，ピークピーク値V_R=15Vののこぎり歯状電圧を印加した。このとき，イメージ抑圧比−30dB が得られた。バランスブリッジ形光スイッチには，スイッチング周波数 f_{SW}=1.5MHz，ピークピーク値V_{SW}=10Vなる方形波電圧を印加した。従ってこの場合，$f_{SW}=5f_R \ll 1/4\tau$となっており，6.3で述べたスイッチング周波数の条件を満足している。デバイスの出力光はAPDでヘテロダイン検波される。

6.6.2　測定結果

まず，APD後段のスイッチングゲートを駆動せずに，APD出力信号の周波数スペクトルを観測した。このときの周波数スペクトルを図6.10に示す。時分割多重化されたXおよびY方向速度のドップラビート信号（f_R-f_{SX}）およ

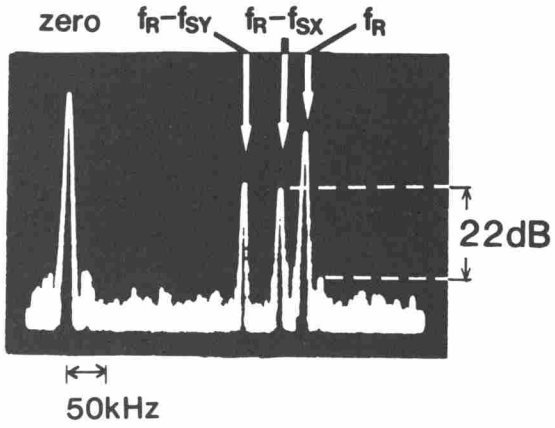
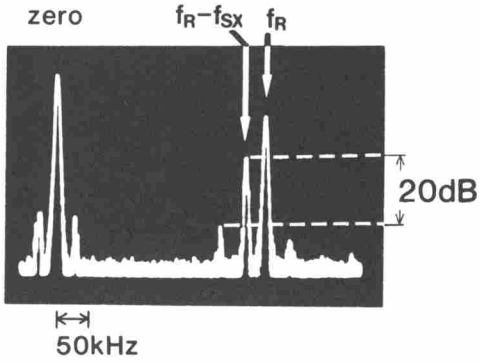
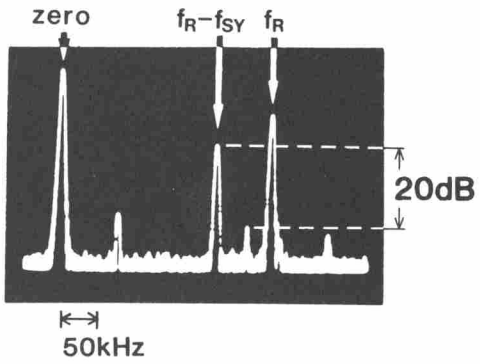


図6.10　スイッチングゲートを駆動しないときに観測した周波数スペクトル



(a)　X方向速度を選択検出



(b)　Y方向速度を選択検出

図6.11　スイッチングゲートを駆動したときに観測した周波数スペクトル

び（f_R-f_{SY}）が同時に観測される。ただし，スイッチングゲートを駆動しない状態では，XまたはY方向速度の特定ができない。次に，スイッチングゲートを光スイッチに同期して駆動し，時分割の信号を復調して周波数スペクトルを観測した。このときの周波数スペクトルを図6.11に示す。(a)はX方向速度，(b)はY方向速度をそれぞれ選択検出したもので，対応するドップラビート信号（f_R-f_{SX}），または（f_R-f_{SY}）が観測される。$f_{SX}=28$ kHz，$f_{SY}=79$ kHz であり，これから移動鏡の速度成分$v_X=9$ mm/sec，$v_Y=25$mm/secが求められる。この

とき，ＳＮ比 20dＢでドップラビート信号が観測された。ＳＮ比は時分割信号を復調したときの漏れ信号（クロストーク）によって制限されており，これは光スイッチの消光比にほぼ一致している。

6.7 結　言

導波形ヘテロダイン干渉計に加えて，光スイッチを集積化した時分割２次元速度計測用光集積回路デバイスについて検討した結果を述べた。

はじめに時分割多重による２次元速度計測の原理，および時分割計測を行うために必要なスイッチング周波数 f_{sw}の条件について述べた。 f_{sw}は，参照光の周波数シフト f_R と，光ファイバにおける信号光の遅延時間τによって制限を受け，時分割計測を行うためには$3f_R < f_{sw} < 1/4\tau$となることが必要である。ただし，光ファイバ長ℓを，その遅延時間が$\tau = n/f_{sw}$となるように設定すれば， f_{sw}の上限を光スイッチの電極容量で決まる周波数帯域まで上げることができる。

Ｚ軸伝搬$LiNbO_3$を基板とするバランスブリッジ形光スイッチがその構成の違いにより，偏光無依存あるいは偏光分離の機能をもつ光スイッチとして動作することを示した。

バランスブリッジ形光スイッチ（偏光分離形）を作製して特性測定を行い，繰り返し周波数１ＭＨｚ，ピークピーク値10Ｖの駆動電圧で，20dＢの消光比を得た。

作製したデバイスを用いて移動鏡の時分割２次元速度計測実験を行った。バランスブリッジ形光スイッチにスイッチング周波数 f_{sw}= 1.5MHz，ピークピーク値V_{sw}=10Ｖの方形波電圧を印加したとき，ＳＮ比20dＢで移動鏡の時分割２次元速度計測を行えることを確認した。

第7章　光集積化技術の高精度変位計測への応用[73),74)]

7.1 緒　　言

これまでに述べたような，ＬＤＶ用光集積回路デバイス実現のために蓄積した知識と技術を統合すれば，より多くのバルク光学部品で構成される複雑で機能性の高いヘテロダイン干渉光学系の集積化も可能である。本章では，高精度の変位計測に利用されている二周波直交偏光干渉光学系[75),76)]の集積化について検討した結果を述べる。二周波直交偏光干渉光学系は，ゼーマンレーザを光源としたヘテロダイン干渉計で，ビート信号の位相差を検出することによって，測定物体の変位を計測するものである。はじめに，バルク部品による二周波直交偏光干渉光学系の構成と変位計測の原理について述べる。次に，この光学系を集積化した変位計測用光集積回路デバイスを提案し，その構成と動作を述べる。本デバイスでは，二周波直交偏光発生素子を集積化しているため，光源として直線偏光レーザを使用できるのが特長である。ここでは，デバイスの主要導波形素子である二周波直交偏光発生素子の構成，特性について述べる。さらに，デバイスを試作して行った変位計測のための基礎実験の結果について述べる。本デバイスによる変位計測においては，デバイス周囲の温度変化によって生じる導波光の位相揺らぎ，光源の周波数変動，および端面の反射光と導波光の減偏光がビート信号の位相差の変化や非直線性誤差の原因となり，測定精度に影響を与える。これらの要因がビート信号の位相差に与える影響を理論的に検討し，本デバイスの測定精度を明らかにする。

7.2　バルク部品構成の変位計測用二周波直交偏光干渉光学系[77)]

図7.1にバルク光学部品による二周波直交偏光干渉光学系の構成例を示す。光源として，He－Ne周波数安定化横ゼーマンレーザが用いられている。横ゼーマンレーザの出射光は，発振周波数差が安定化（$f_1 - f_2 = 0.1 \sim 1$ MHz）された直交直線偏光である。まず，ハーフミラーHMでこれらの光を取り出し，

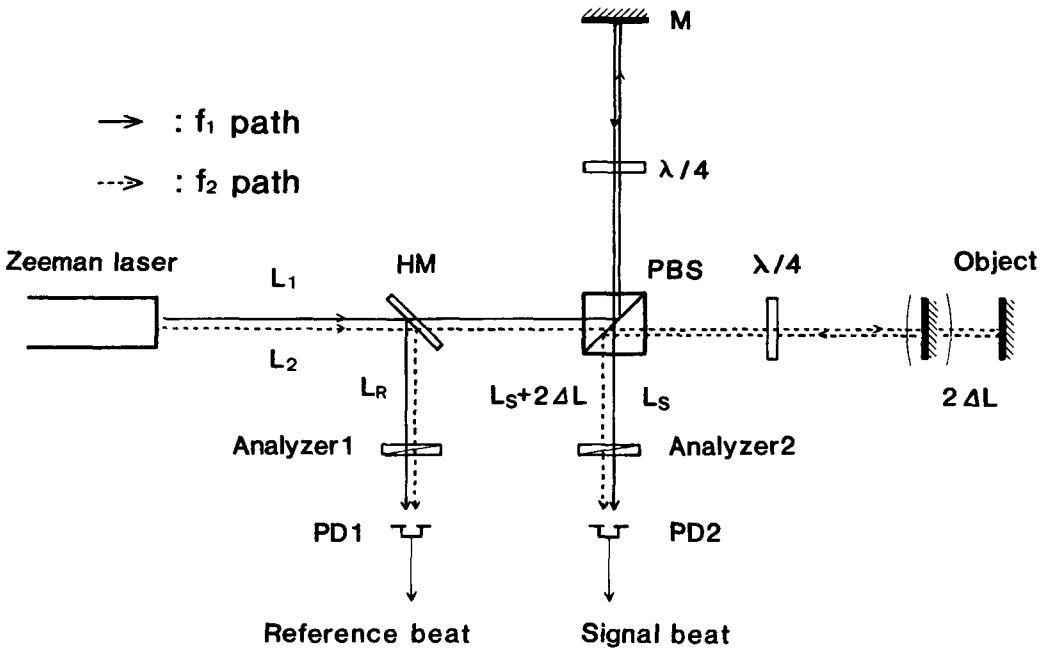


図7.1　二周波直交偏光干渉光学系の構成例

検光子１を通して検出器ＰＤ１でヘテロダイン検波を行うと，

$$I_R = \cos(\omega_b t + \phi_R) \tag{7.1}$$

$$\phi_R = \frac{2\pi}{c}\{f_1(L_1+L_R)-f_2(L_2+L_R)\} \tag{7.2}$$

なるビート信号 I_R を得る。これを参照ビートとする。ただし，$\omega_b=2\pi(f_1-f_2)$ である。一方，ハーフミラーを直進した光を，偏光ビームスプリッタＰＢＳで二つの直交成分に分ける。一方（f_1）を１/4波長板を通して固定鏡に，他方（f_2）を１/4波長板を通して可動鏡（測定物体）に，それぞれ照射する。鏡からの反射光は，どちらも１/4波長板を往復するので，偏光が90°回転し，偏光ビームスプリッタによって検出器ＰＤ２に向かう。検光子２を通してヘテロダイン検波を行うと，

$$I_S = \cos(\omega_b t + \phi_S) \tag{7.3}$$

$$\phi_S = \frac{2\pi}{c}\{f_1(L_1+L_S)-f_2(L_2+L_S+2\Delta L)\} \tag{7.4}$$

なるビート信号 I_S を得る。これを信号ビートとする。ここで，参照ビートと，信号ビートとの位相差$\Delta\phi$を検出すると，

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \phi_S-\phi_R \\ &= \frac{2\pi}{c}\{(f_1-f_2)(L_S-L_R)-2f_1\Delta L\}\end{aligned} \tag{7.5}$$

となり，測定物体の変位ΔLを計測することができる。光源に波長λ＝ 0.633 μm He－Neレーザを使用したとき，たとえば両ビート間の位相差を 1°の精度で検出できるとすると，$\lambda/2\times 1/360=0.88$ nmの精度で変位を計測できることになる。二周波直交偏光干渉光学系では，式(7.5) からわかるようにビートの位相差$\Delta\phi$が，光源からハーフミラーまでの距離L_{i1}，L_{i2}に依存しないので，光源と干渉光学系とを離した構成（リモートセンシング）としても位相差変動の少ない安定な変位計測が可能である。また，参照・信号両ビート（正弦波）の位相差を検出するために，ビートの振幅変動，すなわち光源の強度変動の影響を受けにくいという特長を持っている。

7.3 変位計測用光集積回路デバイスの構成

提案した変位計測用光集積回路デバイスの構成を図7.2に示す。この構成で，7.2の二周波直交偏光干渉光学系を集積化したものとなっている。デバイスは，セロダイン形周波数シフタ（FS），TE－TMモード変換素子（MC），モードスプリッタ（MS）などを，Z軸伝搬$LiNbO_3$基板上に集積化したヘテロダイン干渉計である。本デバイスでは，直線偏光入力光を周波数の異なる2つの直交導波モードに変換する二周波直交偏光発生素子が集積化されている。し

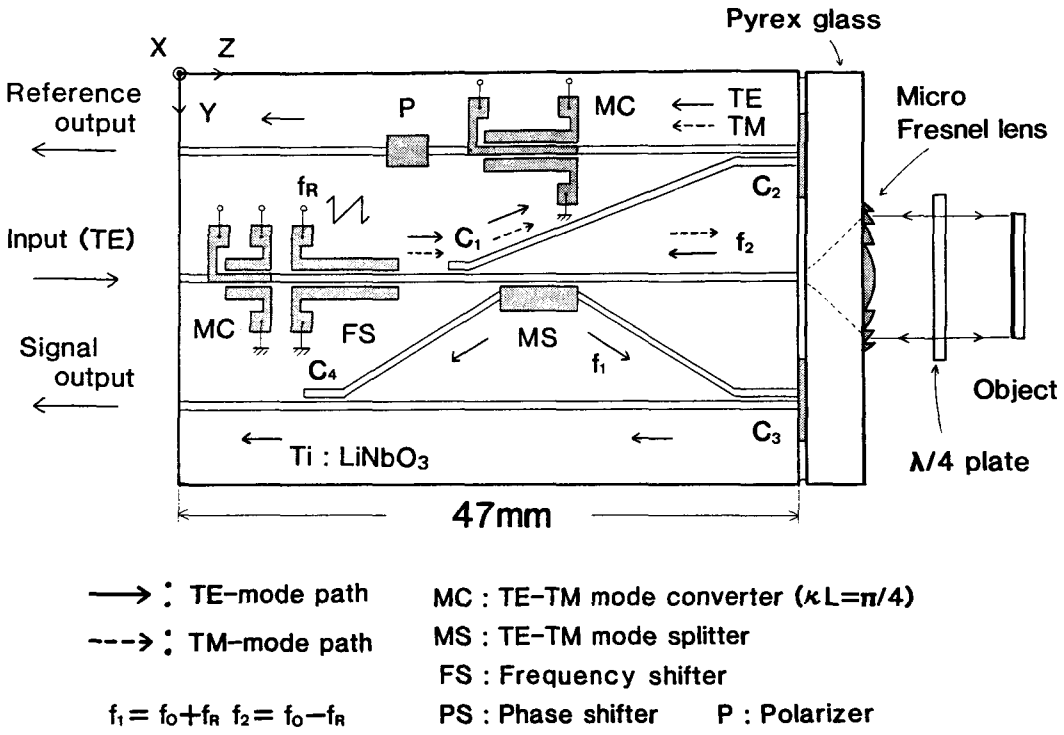


図7.2　提案した変位計測用光集積回路デバイスの構成

たがって，ゼーマンレーザにかわって直線偏光のレーザを光源として使用できるという特長がある。二周波直交偏光発生素子は，入力導波路部分に置かれたＭＣとＦＳを直列に接続した部分である。図で，デバイスの上半分が参照ビートを得るための干渉計，中央から下半分が信号ビートを得るための干渉計である。

入力端面から，周波数 f_0 のＴＥ導波モードが励起されると，二周波直交偏光発生素子によって，周波数 $f_1(=f_0+f_R)$ のＴＥモードと $f_2(=f_0-f_R)$ のＴＭモードが等振幅で発生する。これら二つの導波モードのパワーの一部は方向性結合器 C_1 で上の導波路に導かれ，端面の蒸着ミラーＭおよび３-dBカップラ C_2 で反射し，ＭＣ，金属クラッド形偏光子Ｐを経て上の導波路から出力

される。ここで，MCは$\kappa L=\pi/4$（κ：結合係数，L：電極長）となるようにその印加電圧が設定される。この出力光をヘテロダイン検波すると，$I_R=\cos(\omega_b t+\phi_R)$（$\omega_b=2\pi(f_1-f_2)$）なる参照ビートが得られる。一方，方向性結合器$C_1$を通過した導波モードは，モードスプリッタMSで，TMモードとTEモードに分離される。TE導波モード（f_1）は下の導波路に結合して端面蒸着ミラーMおよび3-dBカップラC_3で反射し参照光となる。TM導波モード（f_2）はMSを直進し，端面から1/4波長板，マイクロフレネルレンズを通して測定物体上に照射する。反射した光は再び1/4波長板を通り，マイクロフレネルレンズ[78),79)]で導波路端面に集光され，TE導波モードとして励起されて信号光となる。この信号光は，MSによって下の導波路に結合し，3-dBカップラC_4において参照光と合波し，下の導波路から出力される。出力光をヘテロダイン検波すると，$I_S=\cos(\omega_b t+\phi_S)$なる信号ビートが得られる。そこで，参照ビートと信号ビートの位相差$\Delta\phi=\phi_R-\phi_S$を検出すると，測定物体の変位を計測することができる。

7.4 二周波直交偏光発生素子

7.4.1 素子の構成

図7.3に二周波直交偏光発生素子の構造を示す。素子は，TE－TMモード変換素子と，セロダイン形周波数シフタとを直列に接続したものである。モード変換素子には，モード結合係数κと電極長Lとの関係が$\kappa L=\pi/4$となるように位相整合用電圧V_1およびモード変換電圧V_2が印加される。そのため，入力TE導波モードは，等振幅のTEモードとTMモードに変換される。セロダイン形周波数シフタには，$LiNbO_3$結晶のY軸に沿って繰り返し周波数f_R，ピークピーク値$V_R=2V_\pi$（V_πは半波長電圧）なるのこぎり歯状電圧が印加される。Z軸伝搬$LiNbO_3$では両モードがほぼ縮退しているのと，$r_{12}=-r_{22}$であることから，両モードの半波長電圧V_πはほぼ等しくなる。したがって，TEモードの出力光周波数が例えば（f_0+f_R）となれば，TMモードの出力光

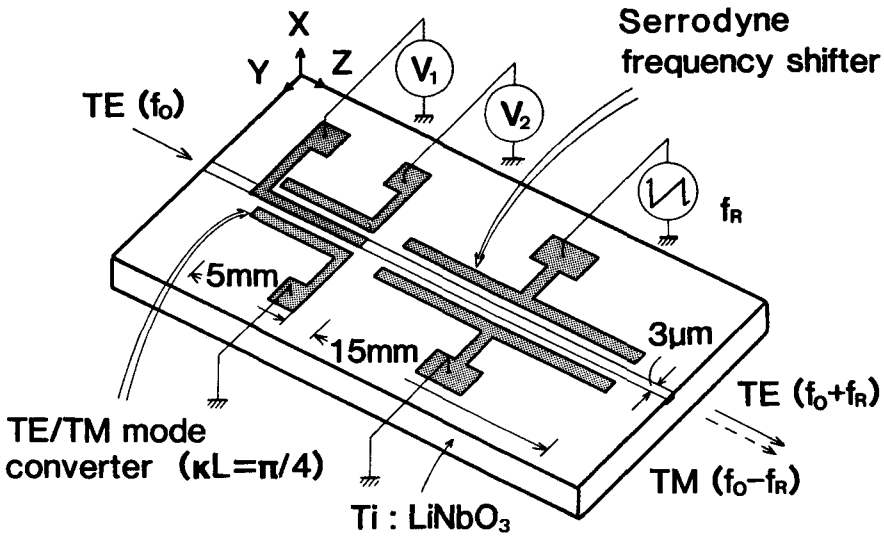


図7.3　二周波直交偏光発生素子の構造

周波数は（f_0-f_R）となる。このように，周波数が $2f_R$ だけ異なり，かつ振幅の等しい互いに直交する二つの偏光を得ることができる。実際には，両モードのV_πはわずかに異なっているが，この影響については次節7.4.2で述べる。

7.4.2　出力光の周波数スペクトル

実際に二周波直交偏光発生素子を試作し，その特性を測定した。モード変換素子は電極長5mm，電極間隔 4μmで，モード変換電圧V_1＝－2V，位相整合電圧V_2＝10Vで$\kappa L=\pi/4$となった。セロダイン形周波数シフタについては，電極間隔 4μm，電極長15mmで，半波長電圧は，TEモードで10.1V，TMモードで11.7Vであった。両モードの半波長電圧の違いは，モード分布がわずかに異なっているためである。セロダイン形周波数シフタでは，3.2で述べたように，印加電圧のピークピーク値V_Rが最適値（$=2V_\pi$）からずれると，イメージ成分など，不要サイドバンド成分が発生する。二周波直交偏光発生素子の周波数シフタでは，この両モードのV_πの差を考慮して，印加のこぎ

り歯状電圧振幅を設定する必要がある。図7.4に，印加電圧V_Rに対する不要サイドバンド抑圧比の関係を示す。印加のこぎり歯状電圧の立ち下がり時間δと周期Tの比は，周波数 100kHzを仮定して，$T/\delta=50$とした。図から，$V_R=21.2$Vのとき，TEとTMモードの不要サイドバンド抑圧比−21dBが得られることがわかる。

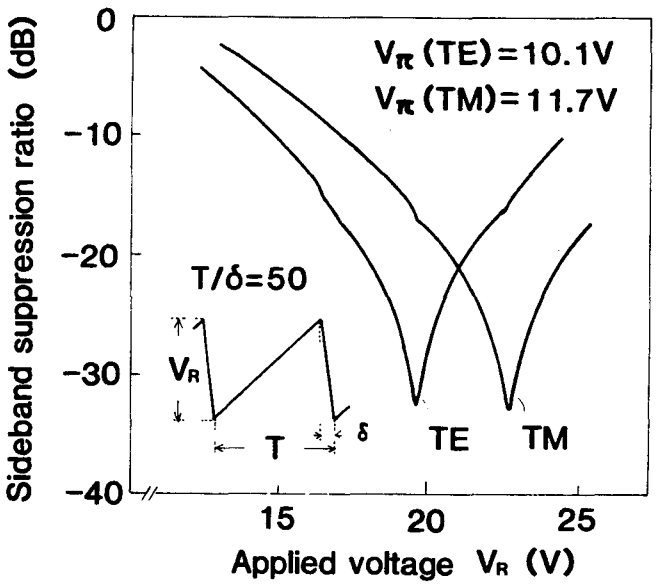


図7.4　印加のこぎり歯状電圧振幅に対する不要サイドバンド抑圧比の関係

試作した素子の出力光の周波数スペクトルを観測した。光学実験系を図7.5に示す。マッハ・ツェンダー干渉計の一方のアームに素子を，他方のアームに音響光学変調器と偏光回転子を挿入し，干渉計の出力光を検光子を通して水平または垂直偏光だけを選択し，APDでヘテロダイン検波を行って出力信号の周波数スペクトルを観測した。観測結果を図7.6に示す。基準周波数 f_A (= 45MHz) を中心として，TEモードでは$+f_R$，TMモードでは$-f_R$ の周波数シフトが得られているのがわかる。モード変換素子の印加電圧$V_1=-2$V，$V_2=10$Vのもとで，周波数シフタの印加のこぎり歯状電圧を$V_R=21$Vとした

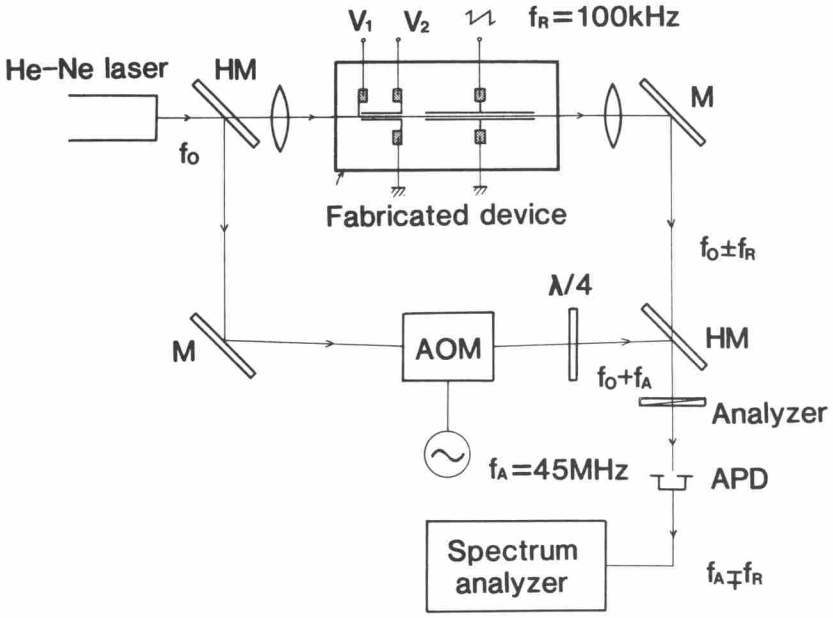
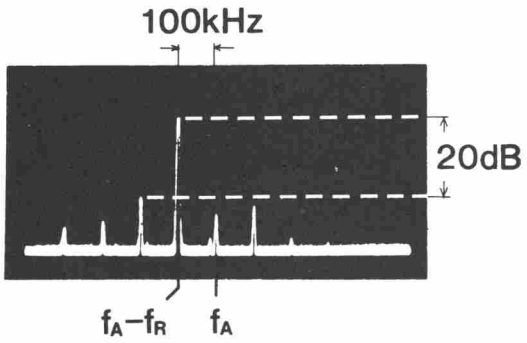


図7.5　二周波直交偏光発生素子の出力光の周波数スペクトルの測定光学系

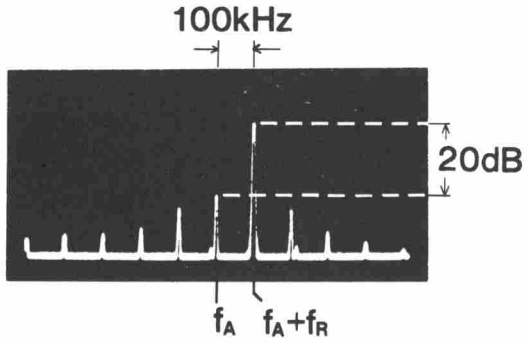
ときに，ＴＥ・ＴＭモードとも，ほぼ計算値に近い－20ｄＢの不要サイドバンド抑圧比が得られた。

7.5　デバイスの試作とビート信号の観測

実際に変位計測用光集積回路デバイスを試作した。導波路パターニングはレーザビーム描画装置を用いた。導波路作製パラメータは，第４章と同一である。両端面研磨後，SiO_2バッファ層，Al電極，Al端面蒸着ミラーを作製した。試作したデバイスでは，出射導波



(a) ＴＥモード出力光



(b) ＴＭモード出力光

図7.6　測定結果

路端面にマイクロフレネルレンズは接続していない。このデバイスを用いて，変位計測を行うための基礎実験を行った。光学実験系を図7．7に示す。入力端面に 0.633 μm He－Neレーザ光を偏光回転子を通して集光し，ＴＥ・ＴＭモ

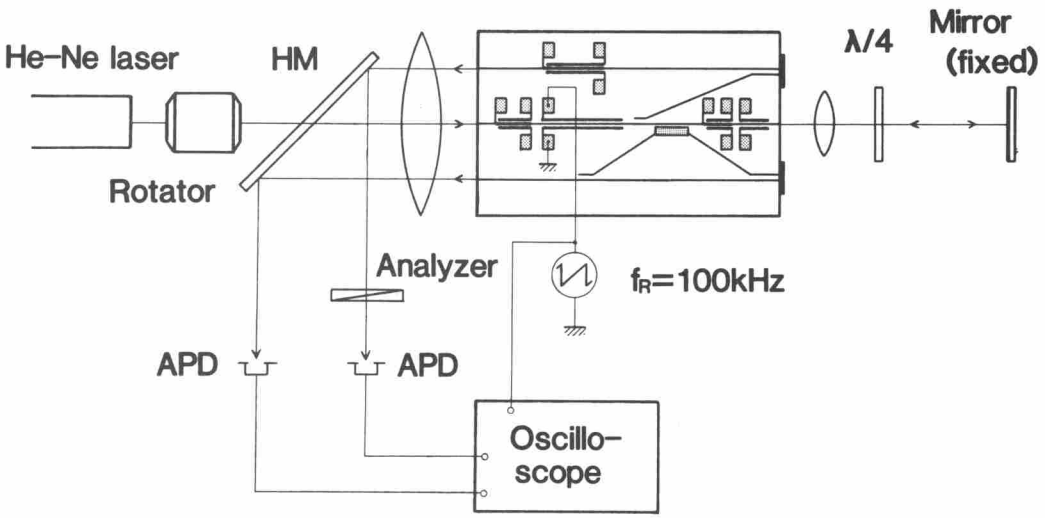


図7．7　変位計測のための基礎実験光学系

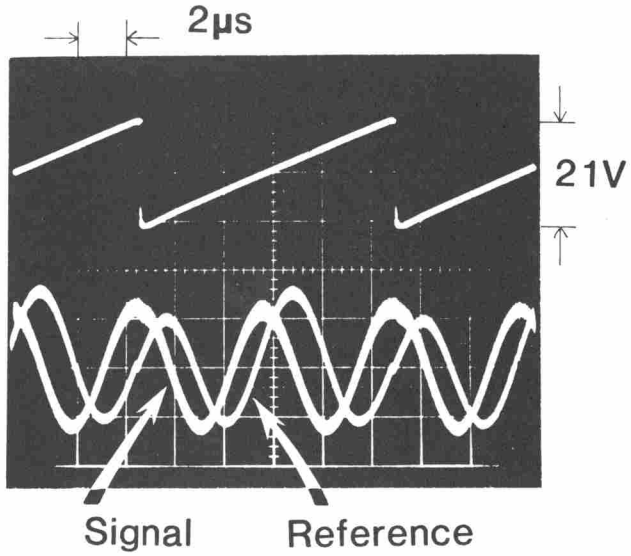


図7．8　観測したビート信号波形

ードを等振幅で励起した。デバイスの出射光を１/4波長板，対物レンズを通して固定鏡面上に集光した。セロダイン形周波数シフタに繰り返し周波数 f_R＝100 ｋＨｚ，ピークピーク値21 Ｖののこぎり波状電圧を印加した。デバイス出力光をハーフミラーＨＭで取り出し，それぞれＡＰＤでヘテ

ロダイン検波を行って参照・信号ビート波形を観測した。図7.8に観測した波形を示す。周波数$2f_R$=200kHzの参照・信号両ビートが位相検出を行うのに十分なSN比で検出できた。この結果，提案・試作した光集積回路デバイスを用いて変位計測が行える見通しが得られた。

7.6 測定精度の検討

提案した変位計測用光集積回路デバイスの測定精度に影響を与える要因としては，(1)周囲の温度変化，(2)光源の周波数変動，(3)出射導波路端面での反射光と導波光の減偏光が考えられる。(1)(2)については，ビート周波数を検出するLDVと異なり，ビート位相を検出する変位計測では，周囲の温度変化や光源の周波数変動によって生じる光波（導波光）の位相変化が，直接ビート位相の変化となる。Z軸伝搬$LiNbO_3$は等方性であるために，X・Y軸伝搬$LiNbO_3$に比べて温度変化に対して安定であると考えられるが，その定量的な検討はまだ行われていない。(3)については，バルク光学部品にはない光集積回路デバイス固有の問題として，端面反射光の存在がある。これらの要因が本デバイスの測定精度に及ぼす影響を理論的に検討する。

7.6.1 温度変化の影響

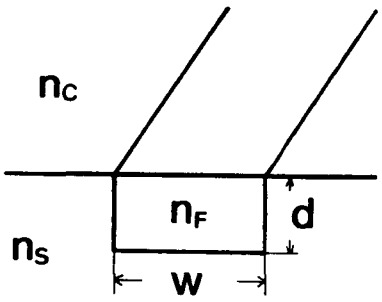
デバイス周囲の温度が変動すると，基板の屈折率および長さが変化し，導波光の位相が変動する。この影響を考慮して参照・信号両ビートの位相差の温度係数を計算する。計算手順としては，導波路，およびTE－TMモード変換素子，モードスプリッタの各主要導波形素子について，その導波光の位相の温度微分を求め，この結果をもとにビート位相差の温度係数$\delta\Delta\phi/\delta T$を求める。まず，バルク$LiNbO_3$結晶の屈折率の温度係数，ならびに線膨脹係数を表7.1に示す。

これらの値から，Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路の実効屈折率の温度係数を等価屈折率法を用いて求めた。計算モデルを図7.9に示す。基板および導波層の温度変化による屈折率変化，および導波路幅，深さの温度変化による膨脹を考慮し

表7.1　バルク$LiNbO_3$結晶の基本パラメータの温度係数（室温）[80]

屈折率の温度係数	$\partial n_o/\partial T$	5.6×10^{-6}
	$\partial n_e/\partial T$	5.3×10^{-5}
線膨脹係数	$\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}$	1.5×10^{-5} (along X, Y axis)
		0.75×10^{-5} (along Z axis)

ている。計算結果を表7.2に示す。



$$n_c = 1$$
$$n_s = 2.29 + \Delta n_s(T)$$
$$n_F = 2.286 + \Delta n_F(T)$$
$$w = 3.0 + \Delta w(T) \quad (\mu m)$$
$$d = 2.0 + \Delta d(T) \quad (\mu m)$$

図7.9　Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路の実効屈折率の温度係数の計算モデル

表7.2　Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路の実効屈折率の温度係数（室温）

実効屈折率	$\partial N_{TE}/\partial T$	5.65×10^{-6}
	$\partial N_{TM}/\partial T$	5.65×10^{-6}
実効屈折率差	$\partial (N_{TE}-N_{TM})/\partial T$	-1.0×10^{-9}

次に，デバイス中には，結晶のZ軸と光波の伝搬方向がθ（＝1/100rad）の角度を有する導波路（以後，斜め導波路と呼ぶ）もある。このような斜め導波路においては，TEモードの感じる屈折率がθに応じて変化する。たとえば基板の屈折率n_{STE}については，

$$n_{STE}(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2\theta + n_o^2 \sin^2\theta}} \qquad (7.6)$$

となる[46]。式(7.6)を考慮して，斜め導波路（θ＝1/100rad）の実効屈折率の温度係数を求めた。計算結果を表7．3に示す。

表7．3　Z軸伝搬$LiNbO_3$斜め導波路（1/100rad）の実効屈折率の温度係数（室温）

実効屈折率	$\partial N_{TE}/\partial T$	5.48×10^{-6}
	$\partial N_{TM}/\partial T$	5.65×10^{-6}
実効屈折率差	$\partial (N_{TE}-N_{TM})/\partial T$	-1.7×10^{-7}

すなわち，Z軸と伝搬方向が完全に一致している導波路では，実効屈折率の温度係数はバルクとほとんど同じ値をとり，実効屈折率差の温度係数は10^{-9}オーダとなる。また，Z軸と伝搬方向が1/100radの角度を有する斜め導波路では，TEモードの一部が異常光線となるため，実効屈折率差の温度係数が10^{-7}オーダとなる。しかし，この値も常光線と異常光線の屈折率差の温度係数（-4.7×10^{-5}）と比べれば，2桁以上小さい値となっている。

次に，導波路，およびTE－TMモード変換素子，モードスプリッタの各主要導波形素子の温度変化に対する導波光の位相θの温度係数を計算する。本デバイスにおいては，ビートの位相差は，光源からカップラC_1までのTE・TM両モードの光路長（図7．1のL_1，L_2に対応）に依存しないため，セロダイン形周波数シフタの導波光位相の温度係数については考慮する必要がない。

(1) 長さL，実効屈折率Nの導波路について，その導波光の位相θ_{WG}は，

$$\theta_{WG} = -kNL \qquad (7.7)$$

従って，その温度微分は次式のようになる。

$$\frac{\partial \theta_{WG}}{\partial T} = -k\left[\frac{\partial N}{\partial T}L + NL\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}\right)\right] \tag{7.8}$$

(2) TE－TMモード変換素子については，導波光の光路が次の4つに分かれているため，それぞれの光路について独立に計算する。

1．入力：TE　出力：TE
2．入力：TE　出力：TM
3．入力：TM　出力：TM
4．入力：TM　出力：TE

1，3の光路については，モード結合理論[42]より，

$$\theta_{MC1} = -kNL \pm \tan^{-1}\left[\frac{k\Delta N}{\kappa}\tan(\kappa L)\right] \tag{7.9}$$

$\kappa L \fallingdotseq \pi/4$，$k\Delta N/\kappa \ll 1$の条件の下で，温度微分を計算すると，

$$\frac{\partial \theta_{MC1}}{\partial T} = -k\left[\frac{\partial N}{\partial T}L + NL\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}\right) \pm \frac{\Delta N}{2\kappa}\left(2L - \frac{1}{\kappa}\right)\frac{\partial \kappa}{\partial T} \pm \frac{1}{\kappa}\frac{\partial \Delta N}{\partial T} \pm \Delta NL\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}\right)\right] \tag{7.10}$$

$\partial\kappa/\partial T$については，印加X方向電界を$E_x^e$，印加電界低減係数を$\Gamma$とすると，

$$\kappa = \Gamma\frac{\pi}{\lambda}r_{61}n_o^3E_x^e \tag{7.11}$$

となるので，

$$\frac{\partial \kappa}{\partial T} = \Gamma\frac{\pi}{\lambda}r_{61}\cdot 3n_o^2\frac{\partial n_o}{\partial T}E_x^e$$

$$= \frac{3\kappa}{n_o} \cdot \frac{\partial n_o}{\partial T} \tag{7.12}$$

となる。

2，4の光路についても，モード結合理論より，以下のようになる。

$$\theta_{MC2} = -kNL + \frac{\pi}{2} \tag{7.13}$$

$$\frac{\partial \theta_{MC2}}{\partial T} = -k\left\{\frac{\partial N}{\partial T}L + NL\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}\right)\right\} \tag{7.14}$$

$$\left(\text{ただし } N=\frac{N_{TE}+N_{TM}}{2}, \quad \Delta N=\frac{N_{TE}-N_{TM}}{2}\right)$$

(3) モードスプリッタについては，TE導波モードと，TM導波モードとでそれぞれ独立に考える。

TE導波モードにおいては，

$$\theta_{MSTE} = -kNL + \frac{\pi}{2} \tag{7.15}$$

$$\frac{\partial \theta_{MSTE}}{\partial T} = -k\left\{\frac{\partial N}{\partial T}L + NL\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}\right)\right\} \tag{7.16}$$

また，TM導波モードにおいては，

$$\theta_{MSTM} = -kNL + \tan^{-1}\left(\frac{\Delta}{\beta_c}\tan\beta_c L\right) \tag{7.17}$$

$$\frac{\partial \theta_{MSTM}}{\partial T} = -k\left\{\frac{\partial N}{\partial T}L + NL\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}\right)\right.$$

$$\left.+\frac{1}{\beta_c^2+\Delta^2\tan^2\beta_c L}\left\{\left(\frac{\Delta^2 L}{\cos^2\beta_c L}+\frac{\kappa^2\tan\beta_c L}{\beta_c}\right)\frac{\partial \Delta}{\partial T}\right.\right.$$

$$+\frac{\Delta\beta_c^2}{\cos^2\beta_c L}\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}\right)+\left(\frac{\kappa\Delta L}{\cos^2\beta_c L}-\frac{\kappa\Delta\tan\beta_c L}{\beta_c}\right)\frac{\partial\kappa}{\partial T}\Bigg\}\Bigg] \quad (7.18)$$

$$\left(\text{ただし } N=\frac{N_e+N_o}{2},\quad \Delta=\frac{k(N_e-N_o)}{2},\quad \beta_c^2=\kappa^2+\Delta^2\right)$$

となる。ただし，N_eおよびN_oは，方向性結合器部分における偶・奇モードの実効屈折率である。

式 (7.7)～(7.18)，および表7.2，7.3をもとにして，本デバイスの参照および信号ビートの位相ϕ_R，ϕ_Sの温度係数を主要導波形素子，導波路部分別に算出した。結果を表7.4，7.5にまとめる。

表7.4　参照ビート位相ϕ_Rの温度係数

	$\partial\phi_R/\partial T$
導波路（干渉アーム部；50mm）	2.16×10^{-2}
TE－TMモード変換素子(10mm)	2.29×10^{-5}
導波路（出力部；15mm）	-1.44×10^{-9}
計（rad／℃）	2.16×10^{-2}

表7.5　信号ビート位相ϕ_Sの温度係数

	$\partial\phi_S/\partial T$
導波路（入力部；3mm）	2.09×10^{-5}
モードスプリッタ(1.8mm)	5.66×10^{-5}
導波路（試料端まで；18mm）	2.79×10^{-2}
導波路（試料端から；34mm）	-2.78×10^{-2}
導波路（出力部；15mm）	-1.44×10^{-9}
計（rad／℃）	2.03×10^{-4}

結局，参照・信号両ビートの位相差$\Delta\phi$の温度係数は，

$$\frac{\partial\Delta\phi}{\partial T}=\frac{\partial(\phi_R-\phi_S)}{\partial T}=2.14\times10^{-2}\ (\mathrm{rad/℃})$$
$$=1.08\ (\mathrm{nm/℃}) \qquad (7.19)$$

となる。表より，斜め導波路部分でのわずかな複屈折性が，周囲の温度変化によるビート位相差の変化に最も影響を与えることがわかる。しかしながら，式(7.19)から，デバイスの温度を±1℃以内に安定化すれば，1nmオーダの安定度で変位計測が行えることがわかった。このように，温度変化に対して安定に位相検出が行えるのは，Z軸伝搬$LiNbO_3$が等方性で複屈折性がないためである。

7.6.2 光源の周波数変動の影響

次に，光源の周波数変動の影響について検討する。計算手順は，導波路およびTE－TMモード変換素子，モードスプリッタの各主要導波形素子の導波光の位相の周波数微分を計算し，この結果をもとに，光源の周波数変動δfによるビート位相差の変化$\delta\Delta\phi$を求める。ここでは，$LiNbO_3$の屈折率分散は非常に小さいとして無視する。

(1) 導波光の位相θ_Gの周波数微分は，

$$\frac{\partial\theta_G}{\partial f}=\frac{2\pi}{c}NL \qquad (7.20)$$

(2) TE－TMモード変換素子については，7.6.1と同じように，4つの光路を独立に考える。

1．入力：TE　出力：TE
2．入力：TE　出力：TM
3．入力：TM　出力：TM
4．入力：TM　出力：TE

1，3の光路について，

$$\frac{\partial \theta_{MC0}}{\partial f} = \frac{2\pi}{c} NL \left(1 \pm \frac{\Delta NL}{2N}\right)$$

$$\fallingdotseq \frac{2\pi}{c} NL \qquad \left(\frac{\Delta NL}{2N} \ll 1\right) \tag{7.21}$$

2，4の光路について，

$$\frac{\partial \theta_{MC1}}{\partial f} = \frac{2\pi}{c} NL \tag{7.22}$$

$$\left(\text{ただし } N = \frac{N_{TE} + N_{TM}}{2}, \quad \Delta N = \frac{N_{TE} - N_{TM}}{2}\right)$$

(3) モードスプリッタにおいては，TE・TM導波モードについて，

$$\frac{\partial \theta_{MSTE}}{\partial f} = \frac{2\pi}{c} NL \tag{7.23}$$

$$\frac{\partial \theta_{MSTM}}{\partial f} = \frac{2\pi}{c} NL \left(1 + \frac{\kappa^2}{\kappa^2 \cos^2 \kappa L + \Delta^2 \sin^2 \kappa L} \cdot \frac{\Delta N}{N}\right)$$

$$\fallingdotseq \frac{2\pi}{c} NL \tag{7.24}$$

$$\left(\because \frac{\kappa^2}{\kappa^2 \cos^2 \kappa L + \Delta^2 \sin^2 \kappa L} \cdot \frac{\Delta N}{N} \ll 1\right)$$

$$\left(\text{ただし } N = \frac{N_e + N_o}{2}, \quad \Delta = \frac{k(N_e - N_o)}{2}, \quad \beta_c^2 = \kappa^2 + \Delta^2\right)$$

式(7.20)～(7.24)の結果をみると，導波路および各主要導波形素子の導波光の

位相の周波数微分は，屈折率N長さLの媒質中を伝搬する光波の位相の周波数微分と同じであることがわかる。したがって，光源の周波数変動δfによって生じる参照ビートおよび信号ビートの位相変化$\delta\phi_R$，$\delta\phi_S$は，デバイスの干渉計の全長をL_{IC}とすると，

$$\delta\phi_R = k(N_{TE}-N_{TM})L_{IC}\frac{\delta f}{f} \tag{7.25}$$

$$\delta\phi_S \fallingdotseq 2k\Delta L\frac{\delta f}{f} \tag{7.26}$$

両ビートの位相差の変化$\delta\Delta\phi$は，

$$\delta\Delta\phi = \delta\phi_R - \delta\phi$$

$$\fallingdotseq 2k\Delta L\frac{\delta f}{f} \quad (\because k(N_{TE}-N_{TM})L_{IC} \ll 2\Delta L) \tag{7.27}$$

すなわち，光源の周波数変動によって，光路長差ΔLのバルク部品によるヘテロダイン干渉計が受ける位相変化と同じ結果となる。実際の光路長差において，要求される精度に応じた周波数安定度のレーザを光源に用いる必要がある。表7.6に光路長差ΔL＝10cmの時の，光源の周波数安定度$\delta f/f$に対するビート位相差の変動$\delta\Delta\phi$の関係を示す。

表7.6　光源の周波数安定度$\delta f/f$に対するビート信号の位相差の変動$\delta\Delta\phi$と，対応する変位の変動$\delta\Delta L$の関係（$\Delta L=10$cm）

$\delta f/f$	$\delta\Delta\phi$ (rad)	$\delta\Delta L$ (nm)
10^{-4}	2.0×10^{2}	1.0×10^{4}
10^{-6}	2.0	1.0×10^{2}
10^{-8}	2.0×10^{-2}	1.0
10^{-10}	2.0×10^{-4}	1.0×10^{-2}

ΔL≦10cmのときには，周波数安定度が10^{-8}のレーザを光源に用いれば，≦1nmの安定度で変位を計測できることになる。

7.6.3 出射導波路端面における反射光と導波光の減偏光の影響

バルク部品構成の二周波直交偏光干渉計では，直交偏光間にクロストークが存在すると，変位と信号ビートの位相との間に非直線関係が生ずる[81]。本デバイスにおいては，出射導波路端面での反射光と導波光の減偏光が存在すると，変位と信号ビートの位相との間に非直線関係が生じ，測定誤差の原因となる。図7.10にデバイスの信号ビートの干渉に関与する部分を示した。理想的な場合

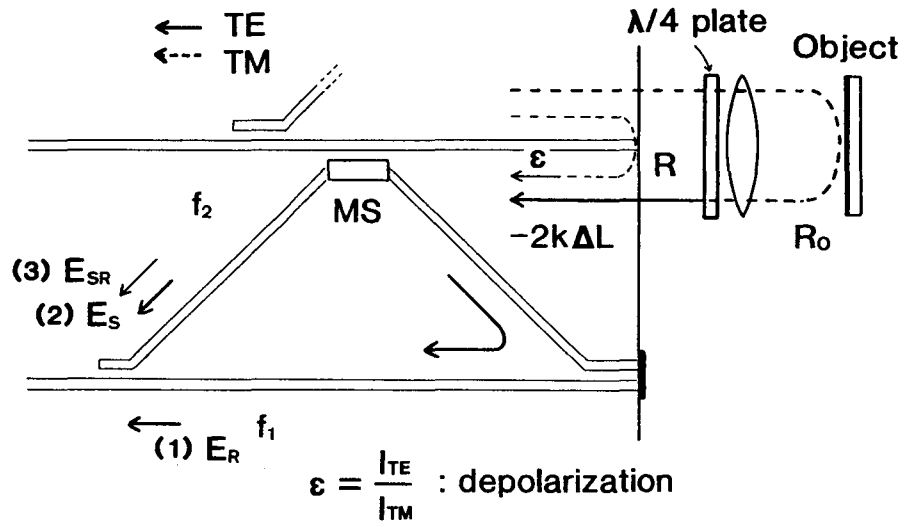


図7.10 実際のデバイスにおける信号ビートの干渉に関与する光波

(1) E_R ：参照光波 (2) E_S ：信号光波

(3) E_{SR}：出射導波路の端面反射と減偏光によって発生した光波

には，信号ビートに関与する光波は，基板端面のアルミ蒸着ミラーで反射した参照光波E_R（TEモード：f_1）と，移動鏡面で反射して戻ってきた（反射率：R_0）信号光波E_S（TEモード：f_2）の二つだけである。しかし，実際のデバ

イスではこれらに加えて，出射導波路端面（反射率：R）における反射光（TMモード：f_2）のうち，直線導波路部分の減偏光（ε）によってTEモードに変換された光波E_{SR}が，モードスプリッタMSによって出力3-dBカップラに向かう(TEモード：f_2)。これら3光波は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} E_R &= A_R \exp(j\omega_1 t) \\ E_S &= A_S \exp[j(\omega_2 t - 2k\Delta L)] \\ E_{SR} &= A_{SR} \exp[j(\omega_2 t + \theta)] \end{aligned} \qquad (7.28)$$

$$\left(\text{ただし，} \quad \frac{A_{SR}}{A_S} = \frac{1}{1-R}\sqrt{\frac{R\varepsilon}{R_0}}\right)$$

信号ビートをE_R，E_S，E_{SR}の3光波の干渉として考えると，その位相ϕ_Sは，

$$\phi_S = \tan^{-1}\frac{\sin(2k\Delta L) - A_{SR}/A_S \cdot \sin\theta}{\cos(2k\Delta L) - A_{SR}/A_S \cdot \cos\theta} \qquad (7.29)$$

となる。したがって，信号ビートϕ_Sと変位ΔLの間の非直線関係に伴う誤差Errorが発生することになる。

$$Error = \phi_S - (2k\Delta L) \qquad (7.30)$$

式(7.29)，(7.30)より誤差の最大値Error maxは，

$$\begin{aligned} Error\ max &= \sin^{-1}\left(\frac{A_{SR}}{A_S}\right) \\ &= \sin^{-1}\left(\frac{1}{1-R}\sqrt{\frac{R\varepsilon}{R_0}}\right) \end{aligned} \qquad (7.31)$$

となる。式(7.31)からわかるように，Error maxは，モードスプリッタのMS比には依存せず，測定物体の反射率R_0，出射導波路端面の反射率R，減偏光εに依存することがわかる。図7.11に，$R_0=0.5$，$\theta=0$，$R=0.15$（$LiNbO_3$

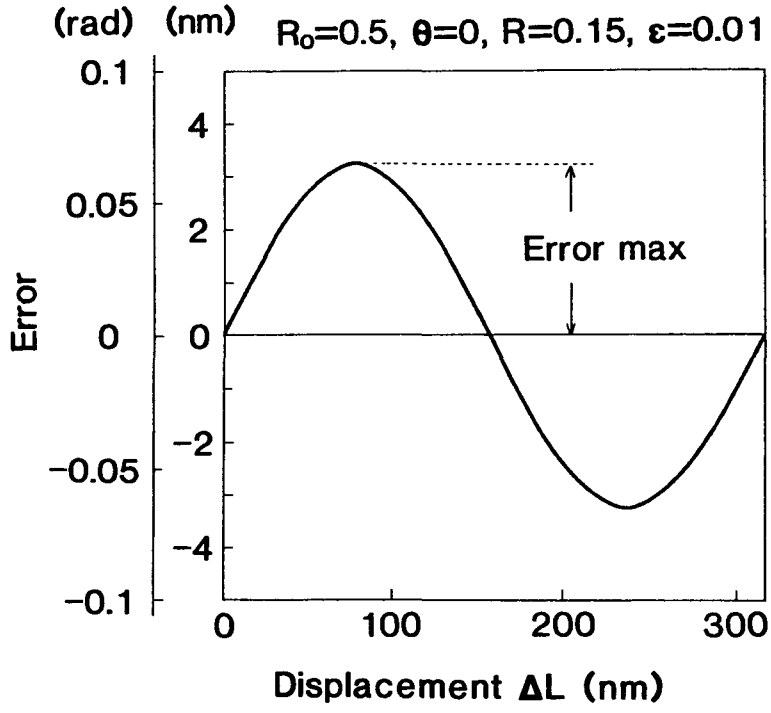


図7.11　端面反射光と減偏光の影響による変位に対する測定誤差の関係

－空気)，ε＝ 0.01のときの変位ΔＬに対する誤差Errorの変化を示す。このとき，Errorの最大値Error maxは 3.2ｎｍとなる。すなわち，本デバイスを用いた変位計測において，デバイス周囲温度を±１℃以内に安定化し，光源に周波数安定度10^{-8}の安定化レーザを用いたときには，端面の反射光と減偏光が測定精度に最も影響を与えることがわかった。測定精度を改善するためには，デバイス端面のフレネル反射率を低減させるか，または，導波光の減偏光を減少させる必要がある。図7.12に減偏光に対する最大誤差Error maxの関係を示す。減偏光１％のとき，端面にマイクロフレネルレンズ（パイレックス基板）を接着してフレネル反射率を 4.7%に低減させると，最大誤差 1.6ｎｍに改善される。

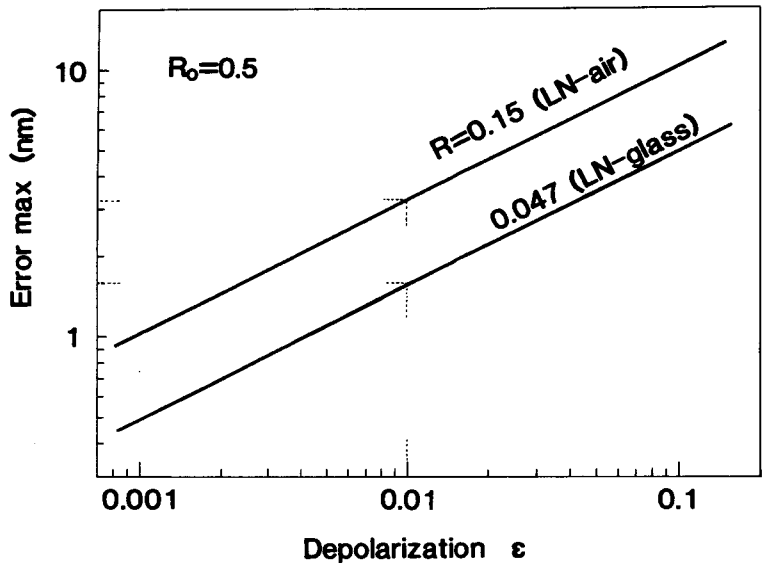


図7.12　減偏光に対する最大誤差の関係

7.7 結　言

高精度変位計測に用いられる二周波直交偏光干渉光学系の光集積回路化について述べた。この光学系は，ゼーマンレーザを光源としたヘテロダイン干渉計で，参照・信号両ビートの位相差を検出することで，測定物体の変位を計測するものである。

まず，二周波直交偏光干渉光学系を光集積回路化したデバイスを提案し，その構成と動作について述べた。提案したデバイスは，セロダイン形周波数シフタ，TE－TMモード変換素子，モードスプリッタをZ軸伝搬$LiNbO_3$基板上に集積化したヘテロダイン干渉計である。

本デバイスの主要導波形素子である二周波直交偏光発生素子について，その構成と実験結果について述べた。モード変換素子の電極長5mm，セロダイン形周波数シフタの電極長15mmで，セロダイン形周波数シフタの印加のこぎり歯状電圧のピークピーク値21Vで不要サイドバンド抑圧比－20 dBが得られた。

デバイスを試作して，変位計測のための基礎実験を行った。端面からHe－Neレーザ光を励起し，デバイス出射光を対物レンズで固定鏡面上に集光した

とき，位相検出を行うのに十分なＳＮ比で参照・信号ビートを検出できた。

(1) デバイス周囲の温度変化，(2) 光源の周波数変動，(3) 出射導波路端面での反射光と減偏光がビートの位相差に与える影響をそれぞれ理論的に検討し，デバイスの測定精度を計算した。その結果，

(1) 周囲の温度変化については，変位に換算して1.08ｎｍ/℃

(2) 光源の周波数変動については，光路長差ΔＬ＝10ｃｍ，光源の周波数安定度10^{-8}のとき，変位に換算して 1ｎｍ

(3) 端面反射光と減偏光については，直線導波路の減偏光が１％，出射導波路端面にマイクロフレネルレンズを接続して端面反射率を4.7%に減少させたとき，最大誤差 1.6ｎｍ

となることがわかった。

以上の検討の結果，提案した光集積回路デバイスを用いて 1ｎｍオーダの精度で変位計測が行える見通しを得た。

第8章　結　　論

光集積回路技術のヘテロダイン計測光学系への応用として，レーザドップラ速度計測光学系の光集積回路化の基礎的検討を行い，いくつかの成果を挙げた。以下，本研究で得られた結果を要約し，今後の課題・問題点を明らかにして本論文の結論とする。

第2章では，

(1) Z軸伝搬Ti 拡散$LiNbO_3$単一モードチャネル導波路を作製し，波長0.633 μmにおいて，伝搬損失，光損傷，減偏光について特性評価を行った。この結果，Z軸伝搬$LiNbO_3$がＬＤＶ用光集積回路デバイスの導波路材料に適していることがわかった。

(2) ＬＤＶ用光集積回路デバイスを提案した。デバイスは，導波形干渉計に加えて，速度計測に必要な光学部品に対応する機能をもつ導波形素子が集積化されている。信号光の送受信用に，偏波保存光ファイバが接続される。

第3章では，デバイスに集積化される主要導波形素子について検討し，Z軸伝搬$LiNbO_3$導波路において，速度計測に必要なバルク光学部品に対応する機能をもつ導波形素子を構成できることを示した。

(1) 導波形周波数シフタ：Z軸伝搬$LiNbO_3$を基板としたセロダイン形周波数シフタについて理論的，実験的検討を行った。電極間隔 4 μm，電極長10 mmの素子で，周波数シフト500kHz のとき，イメージ抑圧比 30dBを得た。

(2) ＴＥ－ＴＭモード変換素子：プレーナ3電極構造からなるモード変換素子について検討した。素子長10mm，位相整合用電圧23V，結合係数調整用電圧 4.8Vで，98%以上の変換効率を得た。

(3) ＴＥ－ＴＭモードスプリッタ：非対称方向性結合器の一方の導波路上に金属を装荷する構造のモードスプリッタを提案した。素子特性の理論的検討を行い，導波路幅の非対称性の最適値が 0.2 μmであることがわかった。作製し

た素子の特性を測定し，結合器長 2.6mmで，ＴＥ・ＴＭモードに対し，それぞれ 11dB，15dBのモードスプリッティング比を得た。

第４章では，

(1) 全長30mmを超える本デバイスの導波路パターンを行うために，レーザビーム描画装置を開発した。描画特性の評価を行い，精度$<0.2\,\mu$mでの描画が可能であることを確かめた。

(2) 端面ブロック装荷法を用いた偏波保存ファイバと導波路との接続を行い，接続効率60～70%を得た。

(3) 作製したデバイスを用いて移動鏡の速度計測実験を行い，25dBのＳＮ比でドップラビート信号を検出した。

第５章では，光源に $0.8\,\mu$m帯ＦＰ形半導体レーザを用いたＬＤＶ用光集積回路デバイスについて検討した。

(1) $0.8\,\mu$m帯ＦＰ形半導体レーザを用いたＬＤＶ用光集積回路デバイスを提案した。このデバイスでは，信号光導波路とともに参照光導波路にも偏波保存ファイバを接続し，光路長差を光源の可干渉距離以下にしている。

(2) 光源，検出器と偏波保存ファイバとの一体化を試みた。

(3) 試作したデバイスを用いて移動鏡の速度計測実験を行い，He－Neレーザと同等のＳＮ比 25dBでドップラビート信号を検出した。また，デバイスの挿入損失の見積りを行い，直線導波路に対するＬＤＶ導波路の過剰損失と，ファイバと導波路との接続損失の改善が課題であることがわかった。

第６章では，高速光スイッチングという光集積回路の特長を活かしたデバイスとして，導波形干渉計に加えてバランスブリッジ形光スイッチを集積化した２次元速度計測用光集積回路デバイスを提案，検討した。

(1) デバイスを試作し，スイッチング周波数１MHz のとき，駆動電圧～10V，ＳＮ比 20dBで移動鏡の２次元速度計測を行えることを確認した。

(2) Ｚ軸伝搬$LiNbO_3$を導波路とするバランスブリッジ形光スイッチが，その構成の違いにより，偏光無依存あるいは偏光分離の機能をもつ光スイッチ

として動作することを示した。

第7章では，

(1) 高精度変位計測に用いられる二周波直交偏光干渉光学系を光集積化したデバイスを提案した。提案したデバイスでは，二周波直交偏光発生素子を集積化しているため，光源に直線偏光レーザを用いることができる。

(2) 二周波直交偏光発生素子の特性を理論的，実験的に検討し，ＴＥ・ＴＭ出力光間に200ｋＨｚの周波数差を与えたとき，両モードで不要サイドバンド抑圧比－20ｄＢを得た。

(3) デバイスを試作して，変位計測のための基礎実験を行い，位相差検出を行うのに十分なレベルのビート信号を検出した。

(4) デバイス周囲の温度変化，光源の周波数変動，出射導波路端面における反射光が変位計測の際の測定誤差となることを示し，各要因についてその大きさを計算した。その結果，測定誤差を決める最も大きな要因が端面反射光と導波光の減偏光であること，提案したデバイスの測定精度が１ｎｍオーダであることが明らかになった。

以上のように，ＬＤＶ用干渉光学系の光集積回路化を通して，$LiNbO_3$ 光集積回路デバイスの計測用ヘテロダイン干渉光学系における実現性，発展性が明らかになった。今後，より高精度の計測用光集積回路を実現するためには，Ｚ軸伝搬$LiNbO_3$ 導波路における減偏光の低減，デバイスの低損失化，および端面反射光の低減化が課題である。また，導波路パターンの描画や偏波保存ファイバと導波路の接続など，デバイスの作製精度も改善する必要がある。素子の集積度を高め，より高度で機能性の高い光集積回路デバイスを実現することも今後の重要課題である。

謝　　辞

本研究を行うに際し，終始懇切な御指導，御鞭撻を賜った大阪大学工学部西原浩教授，小山次郎教授（現在，芝浦工業大学），終始一貫して直接御指導頂いた春名正光助教授に深甚なる感謝の意を表します。

論文作製にあたり，懇篤なる御指導を頂くとともに種々の御高配を賜った大阪大学工学部裏克己教授，吉野勝美教授に深謝の意を表します。

さらに，著者が大阪大学に在学中，御指導と御教授を賜った大阪大学工学部尾崎弘名誉教授，故中井順吉教授，浜口智尋教授，寺田浩詔教授，児玉慎三教授，白川功教授，塙輝雄教授，ならびに大阪大学産業科学研究所中村勝吾教授，角所収教授に深謝の意を表します。

本研究を行うに当たって，終始有益なる御指導を頂いた西原研究室栖原敏明博士，裏升吾博士に心から感謝の意を表します。また，種々の面で御協力頂いた前田朋之技官に感謝の意を表します。本研究の各過程において協力頂いた吉田慎也氏（現シャープ），嶋田純一氏（現日本電信電話），水内公典氏（現松下電器産業），高島稔弘氏（現住友電工），笠澄研一氏，赤下尚司氏（現古河電器工業），樋口洋氏に感謝します。

参 考 文 献

1) S. E. Miller : "Integrated optics: An introduction," Bell Syst. Tech. J., vol.48, no.7, pp.2059-2069 (1969).

2) T. Tamir, H. Kogelnik, J. M. Hammer, F. Zernike and E. Garmire : "Integrated optics," ed. by T. Tamir, Springer-Verlag (1975).

3) 西原, 春名, 栖原 : "光集積回路," オーム社 (1985).

4) R. V. Schmidt and I. P. Kaminow : "Metal-diffused optical waveguide in $LiNbO_3$," Appl. Phys. Lett., vol.25, no.18, pp. 458-460 (1974).

5) M. Fukuma, J. Noda and H. Iwasaki : "Optical properties in titanium diffused $LiNbO_3$ strip waveguides," J. Appl. Phys., vol.49, no.7, pp.3693-3698 (1978).

6) M. Fukuma and J. Noda : "Optical properties of titanium-diffused $LiNbO_3$ strip waveguides and their coupling-to-a-fiber characteristics," Appl. Opt., vol.19, no.4, pp.591-597 (1980).

7) R. C. Alferness : "Guided-wave devices for optical communication," IEEE J. Quantum. Electron., vol.QE-17, no.6, pp.946-959 (1981).

8) I. P. Kaminow : "Optical waveguide modulators," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.MTT-23, no.1, pp.57-70 (1975).

9) R. C. Alferness : "Waveguide electrooptic modulators," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.MTT-30, no.8, pp.1121-1137 (1982).

10) R. V. Schmidt and L. L. Buhl : "Experimental 4×4 optical switching network," Electron. Lett., vol.12, no.22, pp.575-577 (1976).

11) M. Kondo, Y. Ohta, M. Fujiwara and M. Sakaguchi : "Integraged optical switch matrix for single-mode fiber network," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-18, no.10, pp.1759-1765 (1982).

12) W. A. Stallard, T. G. Hodgkinson, K. R. Preston and R. C. Booth :

"Novel $LiNbO_3$ integrated-optic component for coherent optical heterodyne detection," Electron. Lett., vol.21, no.23, pp.1077-1079 (1985).

13) F. S. Chen : "Optically induced change of refractive indices in $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$," J. Appl. Phys., vol.40, no.8, p.3389-3396 (1969).

14) R. L. Holman and P. J. Cressman : "Optical damage resistance of lithium niobate waveguides," Opt. Eng., vol.21, no.6, pp.1025-1032 (1982).

15) R. V. Schmidt, P. S. Cross and A. M. Glass : "Optically induced crosstalk in $LiNbO_3$ waveguide switces," J. Appl. Phys., vol.51, no.1, pp.90-93 (1980).

16) L. M. Johnson, F. J. Leonberger and G. W. Pratt, Jr. : "Integrated optical temperature sensor," Appl. Phys. Lett., vol.41, no.2, pp.134-136 (1982).

17) M. Haruna, H. Nakajima and H. Nishihara : "Optical π-arc waveguide interferometer in proton-exchanged $LiNbO_3$ for temperature sensing," Appl. Opt., vol.24, no.16, pp.2483-2484 (1985).

18) M. Izutsu, A. Enokihara and T. Sueta : "Optical-waveguide micro-displacement sensor," Electron. Lett., vol.18, no.20, pp.867-868 (1982).

19) M. Izutsu, A. Enokihara, N. Mekada and T. Sueta : "Optical-waveguide pressure sensor," 2nd European Conference on Integrated Optics (ECIO '83), Tech. Dig., pp.144-147, Firenze (1983).

20) H. J. Arditty, J. P. Bettino, Ph. Graindorage, H. C. Lefevre, M. Papuchon, Y. Bourbin, S. Vatoux, D. Berard and J. Y. Colombin : "Test results of an integrated fiber-optics gyroscope brass board,"

International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS '83), Proc. pp.147-150, London (1983).

21) J. L. Jackel, C. E. Rice and J. J. Veselka : "Proton exchange for high-index waveguides in $LiNbO_3$," Appl. Phys. Lett., vol.41, no.7, pp.607-608 (1982).

22) R. A. Becker : "Comparison of guided-wave interferometric modulators fabricated on $LiNbO_3$ via Ti indiffusion and proton exchange," Appl. Phys. Lett., vol.43, no.2, pp.131-133 (1983).

23) R. L. Holman, J. R. Busch, 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," 7th Topical meeting on Integrated and Guided-Wave Optics (IGWO '84), Tech. Dig., WC2, Florida (1984).

24) 三品, 朝倉："光ヘテロダイン検出法の計測への応用－ドップラー速度計を中心に－," 応用物理, vol.42, no.6, pp.560-573 (1973).

25) F. Durst, A. Melling and J. H. Whitelaw : "Principles and practice of laser-Doppler anemometry," Academic Press (1976).

26) L. E. Drain : "The laser Doppler technique," John Wiley & Sons (1980).

27) T. Tanaka and G. B. Benedek : "Measurement of the velocity of blood flow (in vivo) using a fiber optic catheter and optical mixing spectroscopy," Appl. Opt., vol.14, no.1, pp.189-196 (1975).

28) 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., vol.21, no.10, pp.1785-1790 (1982).

29) 戸田裕之, 春名正光, 西原浩："ファイバレーザドップラ速度計測用光集

積回路," 信学技報, OQE85-160 (1986).

30) E. M. Garmire and K. Honda : "Depolarization in channel glass waveguides," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol.LT-4, no.2, pp.220-227 (1986).

31) 中谷 : "ＬＤＶの基礎と応用," 1, 流れの計測懇談会編, 日刊工業新聞社 (1980).

32) M. Izutsu, A. Enokihara and T. Sueta : "Integrated optic temperature and humidity sensors," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol.LT-4, no.7, pp.833-836 (1986).

33) H. Toda, M. Haruna and H. Nishihara : "Integrated-optic device for a fiber laser Doppler velocimeter", Electron. Lett., vol.22, no.19, pp. 982-984 (1986).

34) H. Toda, M. Haruna and H. Nishihara : "Optical integrated circuit for a fiber laser Doppler velocimeter," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol.LT-5, no.7, pp.901-905 (1987).

35) 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信学総全大, 954 (1987).

36) B. Chen and C. M. Meijer : "Bragg switch for optical channel waveguides[a)]," Appl. Phys. Lett., vol.33, no.1, pp.33-35 (1978).

37) M. Izutsu, S. Shikama and T. Sueta : "Integrated optical SSB modulator frequency shifter," IEEE J. Quanutm Electron., vol.QE-17, no.11, pp.2225-2227 (1981).

38) F. Heismann and R. Ulrich : "Integrated-optical single-sideband modulator and phase shifter," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-18, no.4, pp.767-771 (1982).

39) K. K. Wong and S. Wright : "An optical Serrodyne frequency translator," 1st European Conference on Integrated Optics

(ECIO '81), Tech. Dig., pp.63-65, London (1981).

40) R. C. Cumming : "The Serrodyne frequency translator," Proc. IRE, vol.45, no.2, pp.175-186 (1957).

41) C. Mariller and M. Papuchon : "A simple and wide optical bandwidth TE/TM converter using Z propagating $LiNbO_3$ waveguides," 3rd European Conference on Integrated Optics (ECIO '85), Tech. Dig., pp.174-176, Berlin (1985).

42) A. Yariv : "Coupled-mode theory for guided-wave optics," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-9, no.9, pp.919-933 (1973).

43) S. Thaniyavarn : "Wavelength-independent, optical-damage-immune $LiNbO_3$ TE-TM mode converter," Opt. Lett., vol.11, no.1, pp.39-41 (1986).

44) M. Haruna, J. Shimada and H. Nishihara : "An efficient TE-TM mode converter using a z-propagation $LiNbO_3$ waveguide," Trans. IECE of Japan, vol.E69, no.4, pp.418-419 (1986).

45) R. C. Alferness : "Efficient waveguide electro-optic TE-TM mode converter/wavelength filter," Appl. Phys. Lett., vol.36, no.7, pp.513-515 (1980).

46) A. Donaldson and K. K. Wong : "Phase-matched mode convertor in $LiNbO_3$ using near-z-axis propagation," Eletron. Lett., vol.23, no.25, pp.1378-1379 (1987).

47) O. Mikami : "$LiNbO_3$ coupled-waveguide TE/TM mode splitter," Appl. Phys. Lett., vol.36, no.7, pp.491-493 (1980).

48) M. Masuda and G. L. Yip : "An optical TE-TM mode splitter using a $LiNbO_3$ branching waveguide," Appl. Phys. Lett., vol.37, no.1, pp.20-22 (1980).

49) H. Nakajima, T. Horimatsu, M. Seino and I. Sawaki : "Crosstalk

characteristics of Ti-$LiNbO_3$ intersecting waveguides and their application as TE/TM mode splitters," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-18, no.4, pp.771-776 (1982).

50) D. Yap and L. M. Johnson : "Passive Ti:$LiNbO_3$ channel waveguide TE-TM mode splitter," Appl. Phys. Lett., vol.44, no.6, pp.583-585 (1984).

51) I. P. Kaminow, W. L. Mammel and H. P. Weber : "Metal-clad optical waveguides: analytical and experimental study," Appl. Opt., vol.13, no.2, pp.396-405 (1974).

52) M. Haruna, S. Yoshida, H. Toda and H. Nishihara : "Laser-beam writing system for optical integrated circuits," Appl. Opt., vol.26, no.21, pp.4587-4592 (1987).

53) 戸田裕之, 春名正光, 西原浩："ファイバレーザドップラー速度計の光集積化," 信学論(C), vol.J70-C, no.10, pp.1415-1422 (1987).

54) R. A. Becker, B. L. Sopori and W. S. C. Chang : "Focused laser lithographic system," Appl. Opt., vol.17, no.7, p.1069-1071 (1978).

55) R. C. Alferness, R. V. Schmidt and E. H. Turner : "Characteristics of Ti-diffused lithium niobate optical directional couplers," Appl. Opt., vol.18, no.23, pp.4012-4016 (1979)

56) 坂野, 皆方, 川上："方向性結合器形光スイッチの微小化の検討－最小完全結合長の測定－," 昭62信学総全大, 938 (1987).

57) K. H. Cameron : "Simple and practical technique for attaching single-mode fibers to lithium niobate waveguides," Electron. Lett., vol.20, no.23, pp.974-976 (1984).

58) H. P. Hsu, A. F. Milton and W. K. Burns : "Multiple fiber end fire coupling with single-mode channel waveguides," Appl. Phys. Lett., vol.33, no.7, pp.603-605 (1978).

59) O. G. Ramer, C. C. Nelson, and C. M. Mohr :“Experimental integrated optical circuit losses and fiber pigtailing of chips,” IEEE J. Quantum Electron., vol.17, pp.970-974 (1981).

60) E. J. Murphy, T. C. Rice, L. Mccaughan, G. T. Harvey and P. H. Read :“Permanent attachment of single-mode fiber arrays to waveguides,” IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol.LT-3, no.4, pp.795-799 (1985).

61) 戸田裕之, 春名正光, 西原浩：“ 0.8μm帯半導体レーザを用いた光集積ファイバレーザドップラ速度計,” 昭63信学総全大, C-426 (1988).

62) M. Born and E. Wolf :“Principles of Optics,” 4th ed., chapt. X, Pergamon Press (1970)

63) 末田, 小林, 朝倉：“レーザーハンドブック,” 8章, レーザー学会編 (1982).

64) 宮本：“光学技術ハンドブック,” 5版, 2.3.2, 久保田, 浮田, 會田編, 朝倉書店 (1969).

65) 柏木他：“レーザーハンドブック,” 20章, レーザー学会編 (1982).

66) 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,” 信学技報, OQE87-121 (1987).

67) H. Toda, K. Kasazumi, M. Haruna and H. Nishihara :“An optical integrated circuit for time-division 2-D velocity measurement,” IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol.LT-7, no.2 (1989掲載予定).

68) K. A. Blake :“Simple two-dimensional laser velocimeter optics,” J. Phys. E, vol.5, no.7, pp.623 (1972)

69) G. R. Grant and K. L. Orloff :“Two-color dual-beam backscatter laser Doppler velocimeter,” Appl. Opt., vol.12, no.12, pp.2913-2916 (1973).

70) R. H. Bahnen and K. H. Koeller :“Laser Doppler velocimeter for

multicomponent measurements using an electro-optical modulator demonstrated for a two-component optical configuration," Rev. Sci. Instrum., vol.55, no.7, pp.1090-1093 (1984).

71) V. Ramaswamy, M. D. Divino and R. D. Standley : "Balanced bridge modulator switch using Ti-diffused $LiNbO_3$ strip waveguides," Appl. Phys. Lett., vol.32, no.10, p.644 (1978).

72) M. Minakata : "Efficient $LiNbO_3$ balanced bridge modulator/switch with an ion-etched slot," Appl. Phys. Lett., vol.35, no.1, p.40 (1979).

73) 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," 信学技報, OQE86-146 (1987).

74) 戸田裕之, 春名正光, 西原浩 : "光集積ヘテロダイン干渉計による高精度位相検出," 第49回応物秋季予稿集, 7P-ZD8 (1988).

75) T. Yoshino and M. Nara : "Accurate fiber-optic sensors using differential heterodyne method," 2nd International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS '84), Proc. pp.233-236, Berlin (1984).

76) 吉田, 久保田, 芳野 : "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," 第32回応物春季予稿集, 31a-P-9 (1985).

77) 芳野, 吉田 : "1nmの微小変位を図る光ファイバ・センサー," 日本マイクロデバイス, no.4, pp.67-77 (1985).

78) K. Miyamoto : "The phase Fresnel lens," J. Opt. Soc. Am., vol.51, no.1, pp.17-20 (1961).

79) 藤田, 西原, 小山 : "電子ビーム描画作製によるブレーズ化マイクロフレネルレンズ," 信学会論文誌(C), vol.J66-C, no.1, pp. 85-91 (1973).

80) Y. S. Kim and R. T. Smith : "Thermal expansion of lithium tantalate and lithium niobate single crystals," J. Appl. Phys., vol.40, no.11, pp.4637-4641 (1969).

81) N. Bobroff : "Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity," Appl. Opt., vol.26, no.13, pp.2676-2682 (1987).

関 連 発 表 論 文

(1) 学会誌

1) H. Toda, M. Haruna and H. Nishihara : "Integrated-optic device for a fibre laser Doppler velocimeter," Electronics Letters, vol.22, no.19, pp.982-984 (1986年9月).

2) H. Toda, M. Haruna and H. Nishihara : "Optical integrated circuit for a fiber laser Doppler velocimeter," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.LT-5, no.7, pp.901-905 (1987年7月).

3) 戸田裕之, 春名正光, 西原浩："ファイバレーザドップラー速度計の光集積化,"信学会論文誌C, vol.J70-C, no.10, pp.1415-1422 (1987年10月).

4) M. Haruna, S. Yoshida, H. Toda and H. Nishihara : "Laser-beam writing system for optical integrated circuits," Applied Optics, vol.26, no.21, pp.4587-4592 (1987年11月).

5) H. Nishihara, M. Haruna and H. Toda : "Integrated heterodyne optics for fiber sensors," Optoelectronics, vol.2, no.2, pp. 277-291 (1987年12月).

6) H. Toda, K. Kasazumi, M. Haruna and H. Nishihara : "An optical integrated circuit for time-division 2-D velocity measurement," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.LT-7, no.2 (1989年2月掲載予定).

(2) 国際会議

1) H. Toda, M. Haruna and H. Nishihara : "Integrated-optic fiber laser Doppler velocimeter : proposal and first demonstration,"

4th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS'86), 4-7, Tokyo (1986年10月).

2) H. Toda, K. Kasazumi, M. Haruna and H. Nishihara : "Time-division 2-D velocity measurement using an integrated heterodyne optics," 2nd Optoelectronics Conference (OEC'88), 4A1-2, Tokyo (1988年10月).

(3) 研究会

1) 戸田裕之, 嶋田純一, 春名正光, 西原浩："ファイバレーザドップラ速度計測光学系の集積化," 第2回光ファイバセンサワークショップ, WOFS2-7 (1985年12月).

2) 戸田裕之, 春名正光, 西原浩："ファイバレーザドップラ速度計測用光集積回路," 電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料, OQE85-160 (1986年2月).

3) 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," 電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料, OQE86-146 (1987年1月).

4) 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," 第5回光ファイバセンサワークショップ, WOFS5-3 (1987年6月).

5) 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," 電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料, OQE87-121 (1987年11月).

6) 戸田裕之, 笠澄研一, 春名正光, 西原浩："光集積ヘテロダイン干渉計による時分割2次元速度計測," 第1回光波センシング技術研究会, LST1-19 (1988年6月).

(4) 学術講演会

1) 戸田裕之，春名正光，西原浩：“ガラス分岐導波路／単一モードファイバによるドップラシフト信号光の検出，” 昭和60年電子通信学会総合全国大会，1024（1985年3月）．

2) 戸田裕之，春名正光，西原浩：“ファイバＬＤＶ用$LiNbO_3$光ＩＣ(I)，”昭和60年秋季応用物理学会学術講演会，2P-L-14 （1985年10月）．

3) 戸田裕之，春名正光，西原浩：“偏波保存ファイバ付レーザドップラ速度計測用光ＩＣ，” 昭和61年電子通信学会総合全国大会，1013（1986年3月）．

4) 戸田裕之，春名正光，西原浩：“ファイバレーザドップラ速度計用光集積回路の試作，” 昭和61年電子通信学会光・電波部門全国大会，455 （1986年9月）．

5) 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，” 昭和61年電子通信学会光・電波部門全国大会，273（1986年9月）．

6) 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，” 昭和62年電子情報通信学会創立70周年記念総合全国大会，954 （1987年3月）．

7) 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，” 昭和62年電子情報通信学会創立70周年記念総合全国大会，965 （1987年3月）．

8) 戸田裕之，春名正光，西原浩：“ 0.8μm帯半導体レーザを用いた光集積ファイバレーザドップラ速度計，” 昭和63年電子情報通信学会春期全国大会，C-426 （1988年3月）．

9) 笠澄研一，戸田裕之，春名正光，西原浩：“時分割2次元速度計測用光ＩＣ，” 昭和63年電子情報通信学会春期全国大会，C-427 （1988年3月）．

10) 戸田裕之，春名正光，西原浩：“光集積ヘテロダイン干渉計による高精度位相検出，” 昭和63年秋季応用物理学会学術講演会，7P-ZD8（1988年10月）．

11) 春名正光，戸田裕之，笠澄研一，西原浩：“光ファイバレーザドップラ速度計の集積化の現状と課題，” 昭和63年電気関係学会関西支部連合大会，S6-1（1988年11月）．