OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	高速導波形光変調素子とその集積化に関する研究
Author(s)	芳賀, 宏
Citation	大阪大学, 1985, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/24547
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

高速導波形光変調素子とその集積化に関する研究

芳賀　宏

昭和６０年２月

大阪大学大学院基礎工学研究科

高速導波形光変調素子と
その集積化に関する研究

芳賀　宏

昭和６０年２月

大阪大学大学院基礎工学研究科

内容梗概

本論文は筆者が大阪大学大学院基礎工学研究科（物理系専攻，電気工学分野）在学中に行なった“高速導波形光変調素子とその集積化に関する研究”をまとめたものである。全体は６章および付録から構成されている。以下各章ごとにその内容の概要を述べる。

第１章　序論

本章では、まず、導波形光変調素子およびその集積化についてこれまでの研究を概観している。特に高速動作に適した電気光学効果を用いた種々の光変調素子・光スイッチとその集積化について述べている。更にこれを背景として本研究の目的と意義を明らかにしている。

第２章　高速導波形光変調素子

本章では、本研究を通じて基本的な役割を占める干渉形光強度変調素子、特に導波路Ｙ分岐を用いたものについて述べ、次章以後の基礎としている。はじめに、構成および動作原理について述べ、次に変調素子を高速動作させるために重要な要素である電気回路の構成について述べる。さらに、Ti拡散 $LiNbO_3$ 導波路を用いた進行波動作干渉形光強度変調素子の試作・実験の結果を示し、素子の高能率化・集積化のために特に考慮すべき点を明らかにしてる。

第３章　干渉形光変調素子の高能率化

本章では、干渉形光変調素子の高能率化について考察し、 $LiNbO_3$ ｚ板を用いた高能率な素子の構成法を提案している。まず、高次モードおよび

平行導波路間での光結合が変調特性に与える影響について論じている。次に、進行波動作の変調素子において、光波と変調波の速度非整合、伝送線路の損失およびインピーダンス不整合等が変調特性に与える影響について述べている。これらの検討から、高能率化のために光の結合および速度非整合の改善の必要性を指摘している。さらに、それらの改善のために、平行導波路間基板上に微小な溝を形成した変調素子を提案している。これは平行導波路間の溝が導波路間の光の結合減少効果に加え速度非整合改善効果を有することに着目したものである。それぞれの改善効果を実験および数値解析により明らかにした後、この結果に基づいた素子の試作・実験を行なった結果について述べている。

第４章　干渉形光変調素子の集積化

本章では、複数の変調素子を単一基板上に集積化する場合の諸問題を考察している。集積化に伴い素子単体では生じなかった新たな問題点が生じる。まず、干渉形光変調素子を単一基板上、光波伝搬方向に縦続接続した場合について、前段の素子から伝搬する高次モードあるいは放射モードが次段の素子に与える影響について考察し、この結果に基づき変調素子を縦続接続して構成した光信号相関器の試作・実験の概略を示している。次に、素子を光波伝搬方向に対して並列に集積化した場合に生じる光学的、電気的干渉について解析および実験的に行なった検討結果について述べている。

第５章　光変調素子の集積化による１×４光スイッチとその応用

本章では、光変調素子の集積化の一例として、３個の変調素子を集積化することによって構成された１入力４出力の高速光スイッチとその応用について述べている。まず、基本構成素子である１入力２出力光スイッチの

構成および動作の概略を示し、これらを単一基板上に集積化した１入力４出力光スイッチの構成を示している。次に、この光スイッチの応用として、単一正弦波駆動による光タイムデマルチプレクサを提案している。提案した方式では、変調電圧が正弦波であるため、各変調素子が広帯域である必要性がなく、さらに変調電源が単一でよいといった利点を有する。最後に前章で述べた集積化における問題を考慮して、実際に $LiNbO_3$ 基板上に素子集積化を行ない試作した光スイッチを用いて行なった基礎実験の結果について述べている。

第６章　結論

本章では、本研究で得られた成果を総括し、さらに、今後における問題点や課題について述べている。

目次

第1章　序論 …… 1

第2章　高速導波形光変調素子

2．1　序言 …… 5

2．2　干渉形光強度変調素子 …… 5

2．2．1　干渉形光強度変調素子の構成と動作 …… 5

2．2．2　変調用電気回路 …… 8

2．3　$LiNbO_3$ 導波形光変調素子の試作・実験 …… 10

2．3．1　$LiNbO_3$　y板とz板 …… 10

2．3．2　$LiNbO_3$ 干渉形光強度変調素子 …… 12

2．4　結言 …… 15

第3章　干渉形光変調素子の高能率化

3．1　序言 …… 17

3．2　干渉形光強度変調素子の設計における問題点 …… 18

3．2．1　導波路伝搬モードの影響 …… 18

3．2．2　平行導波路間の光波の結合の影響 …… 20

3．2．3　進行波動作における伝送線路特性と変調帯域 …… 22

3．3　$LiNbO_3$ 干渉形溝付光変調素子 …… 25

3．3．1　素子の構成 …… 25

3．3．2　溝による消光比改善効果 …… 26

３．３．３　溝による速度非整合改善効果 …… 27
３．３．４　溝による変調電界分布の変化 …… 29
３．４　素子の設計と試作 …… 30
３．５　変調実験 …… 31
３．６　結言 …… 35

第４章　干渉形光変調素子の集積化
４．１　序言 …… 37
４．２　干渉形光変調素子の縦続接続 …… 37
４．２．１　高次モードの変調特性への影響 …… 37
４．２．２　集積化光信号相関器の試作・実験 …… 40
４．３　干渉形光変調素子の並列集積化 …… 44
４．３．１　光波による素子間の干渉 …… 45
４．３．２　変調電極間での干渉 …… 47
４．４　結言 …… 49

第５章　光変調素子の集積化による高速１×４光スイッチとその応用
５．１　序言 …… 51
５．２　集積化１×４光スイッチ …… 52
５．２．１　相補出力付光変調素子 …… 52
５．２．２　１×４光スイッチの構成 …… 54
５．３　単一正弦波駆動光タイムデマルチプレクサ …… 55
５．３．１　正弦波駆動による光サンプリング …… 55

５．３．２　光タイムデマルチプレクサの構成法 …… 57
５．４　設計及び試作 …… 59
５．５　１×４光スイッチの基本特性測定 …… 62
５．６　光タイムデマルチプレクサ実験 …… 64
５．６．１　低周波動作実験 …… 64
５．６．２　高周波動作実験 …… 65
５．７　結言 …… 67

第６章　結論 …… 70

謝辞 …… 74

参考文献 …… 75

付録１　Ｔｉ拡散ＬｉＮｂＯ$_3$光導波路の作製法 …… 77
付録２　高周波における強度変調度の測定 …… 79
付録３　高速光強度変調波形の観測 …… 81
付録４　行列表示による式の導出 …… 84

関連発表論文 …… 89

第１章　序論

1969年 Miller による光集積回路（光ＩＣ）の概念[1]の提案を契機にintegrated optics あるいはoptical integrated circuitと呼ばれる研究分野が開拓された。それ以来、薄膜光導波路作製技術を基礎に各種光ＩＣの開発研究が行なわれてきている。現在のところ、光ＩＣとして完成度の高い集積化光スペクトラムアナライザ[2,3] の例を除けば、いずれも個々の導波形光デバイスの開発・研究が主であり、一部、それらを集積化した新しい機能素子の研究が行なわれている段階である。

導波形光デバイスなかでも光変調器・光スイッチ[4] は、通信、信号処理、計測などの光エレクトロニクスシステムを構成する上で重要な素子である。特に電気光学効果を用いたものは変調が容易かつ高速であり、これまでに GHz以上の高速変調を行なっている導波形光変調素子には、従来のバルク形の小型化・高能率化を図り、直線導波路をもちいて作製した位相変調器[5] 、それを互いに直交する偏光子、検光子の間に配置した直交ニコル形の強度変調器[6] 、２本の平行導波路間の分布結合を制御する方向性結合器形光変調器[7-9] 、および本研究で対象としている干渉形光変調器がある。

光強度変調素子を考えると、直交ニコル形では温度安定性の点で問題がある。方向性結合器形では両導波路の位相整合ならびに結合長整合を得るために厳密な作製精度が要求され、それを緩和するために可変屈折率膜装荷[10]ならびに$\Delta\beta$反転[10]などの方法を必要とする。干渉形光変調器の中では、導波路Ｙ分岐をもちいたものが比較的作製が容易であり、温度安定性も優れているが、より小型化を進めると平行導波路間の光の結合により特性が劣化するという問題がある。

変調用電気回路に注目すると、集中定数動作[8]、進行波動作[6,12]によるものとがある。前者の変調帯域幅が 5 GHz程度であるのに対し後者のものは 10 GHz 以上を実現している。また高速動作を行なうには必ずしも広帯域である必要はなく、狭帯域な変調素子において共振形の電極構造を用いる試みもなされている[13]。

進行波動作の場合、変調帯域を制限する要因は、基本的には、光導波路中および変調電極線路を伝搬する光波および変調波間の速度非整合である。これは基板材料の誘電率および電極構造により定まる。光波および変調波に対する誘電率は材料固有のものであり、 GaAs のように両者が近い値を持つ材料もあるが、一般には異なった値である。従って両者の伝搬速度は一般に異なっているため、電極および基板形状になんらかの工夫をこらすことにより速度非整合を改善する必要がある。これまでにいくつかの速度非整合改善法が提案されているが[14-17]、10 GHz以上の広帯域にわたり実験的に確認しているものは見当たらない。

光変調器を導波形として構成する意義は、従来のバルク形と比べて小型化・高性能化を図れる点とともに、モノリシックあるいはハイブリッド光集積回路の変調素子としての有用性にある。変調素子を集積化したものとしてはこれまでに、ＡＤ変換器[18,19]、光スイッチマトリックス[20]、光ＳＳＢ変調器[21]、光論理回路[22]等が提案されており、それらの一部が試作・実験により基礎的な動作の確認が行なわれている段階である。

導波形光素子の集積化を行う場合、誘電体光導波路はマイクロ波領域での導波管とは異なり開放導波系であるために、異なる導波路を伝搬する光波間の干渉が起り易い。素子単体では、方向性結合器のようにこの性質を積極的に利用する場合もあるが、複数の素子間ではこのような干渉あるい

は複数の電極間での干渉が望ましくない種々の問題を引き起すことも多い。これまでに、複数の方向性結合器形光スイッチを集積化した場合における電極間干渉によるクロストークを検討している報告[23]以外には、これらの問題を検討している例は見当たらない。

以上のような研究の流れの中で、筆者は高速・高能率な導波形光変調素子とそれを集積化した新しいデバイスの開発を目指した研究を行なってきた。まず、光強度変調素子としての干渉形光変調素子の有用性に注目し、また従来位相変調素子で広帯域な動作を実現していた非対称電極構造[5]を採用することにより、 Ti 拡散 $LiNbO_3$ 光導波路を用いて 10 GHz 以上の広帯域な素子 [24] を実現した。その後さらにこれを発展させ、より高能率な素子を実現させるため、導波路間の光の結合を抑えると同時に速度非整合改善効果をもつ方法を提案し、 半波長電圧 3 V 、 3-dB 帯域幅 12 GHz という高能率・広帯域な素子を実現している [25,26] 。 一方、干渉形光変調素子の集積化については、集積化に伴って生じる諸問題の解決を図り、２つの素子を単一基板上に縦続接続して構成した高速光相関器 [27,28] を作製し、光を用いたピコ秒領域における信号処理の基礎実験をいちはやく行なった。さらにこの成果を基礎として、３つの干渉形光変調素子を集積した多端子光スイッチを構成し、正弦波変調による光サンプリング技術を用いて、新たに多端子光スイッチに応用した光タイムデマルチプレクサの構成法を提案し、はじめて Gb/s 以上の光信号処理の可能性を実証した [29-32] 。

本論文は第２，３章の干渉形光変調素子単体ならびに第４，５章の干渉形光変調素子の集積化に関する研究の２つの部分から成っている。第２章

では、干渉形光変調素子、特に導波路Y分岐を用いた構成のものについてその動作の基礎を説明した後、試作・実験の結果を示し、改善すべき問題点を明らかにする。第3章では、干渉形光変調素子の高能率化について考察し、平行導波路間の光の結合および光波と変調波の速度非整合を改善する素子構成を提案する。さらに、それぞれの改善効果について実験的・理論的に検討を加え、試作・実験によりその動作を実証する。第4章では、干渉形光変調素子の集積化において生じる問題点を明らかにし、解決法を述べる。第5章では、干渉形光変調素子を集積化した新しい多端子光スイッチの構成を示し、その応用として新たな光タイムデマルチプレクサを提案し、試作・動作実験によりその有効性を実証する。最後に、以上の各章で得られた結果を総括し、また今後の問題点・課題を加えて、第6章に述べる。

第２章　高速導波形光変調素子

２．１　序言

本章では、本研究を通じて基本的な役割を占める干渉形光強度変調素子について述べ、次章以後の基礎とする。

これまでに報告されているいくつかの種類の光強度変調器の中では、導波路Ｙ分岐を用いた干渉形光強度変調素子が比較的に作製が容易であり、温度安定性も優れており、導波形光変調素子単体として、あるいは光集積回路の構成素子として適したものであるという観点からその構成・動作について述べる。また変調素子を高速動作させるには、その変調用電気回路が重要な構成要素であるため、高速光変調素子作製において考慮すべき電気回路の構成について簡単に述べる。

さらに実際に、$LiNbO_3$ 基板を用いて試作・実験を行なった結果を示し、変調素子の高能率化、集積化を目指した観点から検討を行ない、今後、考慮すべき問題点を明かにする。

２．２　干渉形光強度変調素子

２．２．１　干渉形光強度変調素子の構成と動作

干渉形光変調素子の構成は図２．１に示すように、入射光を二分し、それらの両方あるいは一方を位相変調し、ふたたび結合したものを出力として得るものである。光の分割および結合には、3-dB方向性結合器［33］、導波路Ｙ分岐、非対称Ｘ分岐［ 35,36］などが用いられる。いずれの場合も、出力光強度は、次式によって表わされる。

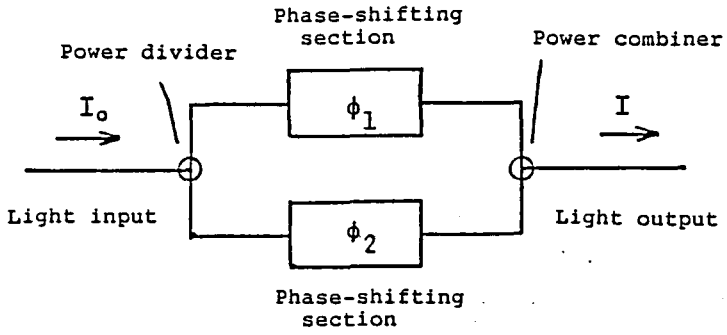


図２．１　干渉形光強度変調素子

$$I_o = I_i \cos^2 (\Gamma/2 + \Phi_0) \qquad (2-1)$$

ここで、

I_i　：　入射光強度

I_o　：　出射光強度

$\Gamma = \phi_1 - \phi_2$ ：リターデーション

ϕ_1 , ϕ_2　　：各位相変調部での移相量

Φ_0　：無変調時に存在する移相量差

分割器および結合器に導波路Ｙ分岐をもちいた干渉形光変調素子の構成を図２．２に示す。光導波路に入射した光波は、Ｙ分岐によって平行な２本の導波路に分割され、それぞれの直線導波路にある変調部において位相変調をうけて、ふたたびＹ分岐によってひとつにまとめられる。

ここで用いられている導波路Ｙ分岐は、基本モードのみが伝搬する３本の導波路から成っている。分割器としてもちいた場合、入力用導波路内を伝搬してきた光波は、分岐部分を経て２本の出力導波路から等しい振幅と位相をもつ光波として出力される。結合器として用いた場合、分割器と相

反関係にあり、２本の入力導波路に等しい振幅と位相をもって入射した光波は、分岐部分を経て出力導波路から出力される。逆位相の場合は、分岐部分を経て放射モードとなり大部分の光は基板内に放射され、出力導波路からは出力されない[34]。

分割および結合用Ｙ分岐間の２本の平行導波路は、適当な変調電界印加用電極を設けることにより、それぞれ、位相変調器として動作する。たとえば、 $LiNbO_3$ z板において、図２．２のような電極構成をもちいると、導波路基板面に垂直方向の電界成分は互いに逆向きになる。したがって、両者を伝搬する光波はポッケルス効果によって互いに逆向きの位相変調を受ける。特性のそろった２本の導波路を伝搬する光波の移相量は、伝搬光路長による移相量をϕ_0、変調電界による位相変化分を$\delta\phi$とすると、それぞれ次のように表わされる。

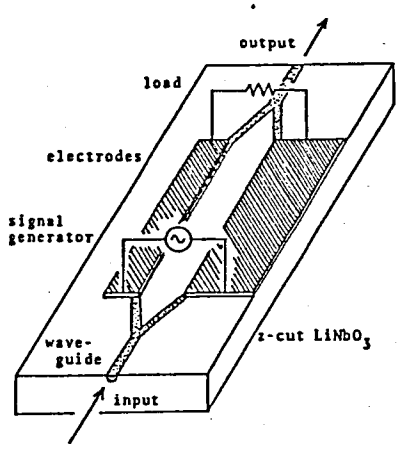


図２．２　導波路Ｙ分岐を用いた干渉形光強度変調素子の構成

$$\phi_1 = \phi_0 + \delta\phi, \quad \phi_2 = \phi_0 - \delta\phi$$

出力光強度は、両移相量の差（$\Gamma = \phi_1 - \phi_2 = 2\delta\phi$）に応じ、

$$I_o = I_i \cos^2(\delta\phi)$$

となり、この変調素子ではいわゆるプッシュプル動作が得られる。光路長による移相量　ϕ_0 は温度変化その他の外乱の影響を受けるが、２つの位相変調部は同一基板上に接近して存在するためほぼ等しい影響を受け、しかも、出力光強度は両移相量が相殺されるため、外乱に対して安定な動作

が可能である。

干渉形光変調素子における光の分割・結合器として、先にのべたように、3-dB方向性結合器を用いたものがあるが、作製の容易さ、温度安定性の面で導波路Y分岐の方が優れていると考える。

方向性結合器では、その出力光強度は、$\cos^2$（C・L） で変化する。ここで、C：結合係数、L：相互作用長である。3 dB結合を得る条件は、C・L＝π/4である。この値を中心にC・Lの変化に対する出力光強度の変化率が最も大きい。干渉形光変調素子においては、分割された2つの光波の電力が異なると、消光比が劣化する。したがって、十分な消光比を得るためには、C，Lの厳密な設定を必要とし、また、厳密に設定した場合でもなお温度変化に対する安定性に問題が残る。

それに対して、導波路Y分岐では、光電力の分配比は分割された光波が伝搬する2つの分枝の対称性によって決まる［35］。拡散法による導波路作製においては、導波路Y分岐の対称性は使用する導波路パターンマスクによってほとんど決まり、作製過程における他の条件には影響されにくい。したがって対称なマスクさえ作製すれば、導波路Y分岐の作製は比較的容易である。温度変化はY分岐を構成する分枝のいずれかに局所的におこらない限り、光電力の分配比に影響を与えない。実際、各分枝は近接して存在するため、通常の状態ではほぼ等しい温度変化を受ける。

このように作製の容易さ、温度安定性の良さなどは、変調素子を単体として用いる場合はもちろん、特に複数の素子を単一基板上に集積化する場合には重要である。

2．2．2　変調用電気回路

1次電気光学効果（ポッケルス効果）の応答速度は高速であり、たとえ

ば $LiNbO_3$ では、100 GHz 以上の変調周波数に応答する可能性が期待できる［37］。現状の電気光学効果を用いた変調素子の応答速度を制限しているのは素子を構成する電気回路、すなわち電極形状、基板誘電率、外部電気回路との整合等である。したがって、変調素子を高速動作させるためには素子を構成する電気回路が重要な働きをする。

変調素子の電極構成としては、大別して、集中定数形と進行波形の２つの形が用いられている。これらは変調素子の広帯域性に視点をおいているが、他に狭帯域ではあるが高速な動作をさせる観点から共振形の電極構成も試みられている［13］。

電極を集中定数的に扱える範囲は、電極の長さＬが電極上での変調波の波長λ［～c_0／（N_m・ｆ）］に比べて十分短い場合である。ここで、ｆ，N_m はそれぞれ変調波の周波数および電極における変調波に対する実効屈折率である。$LiNbO_3$ の平行平面電極構成では、$N_m \fallingdotseq 4.2$ であるので、$f \cdot \lambda \fallingdotseq 7$ GHz･cmとなる。すなわち、電極上での波長は周波数 1 GHz の場合、約 7 cm となる。したがって、電極長を波長の1/10程度に考えた場合、1 GHz 以上の周波数を扱うには電極長が 7 mm 以下である必要がある。実際には、本来分布定数的に扱うべき範囲でも簡単のため集中定数的に扱っている場合が多い。このときの変調帯域幅Δｆは光波の走行時間および電極容量Ｃと負荷抵抗Ｒによる充放電時間によって制限される。誘電体材料ではＣＲによる制限が主なものとなり、$LiNbO_3$ では、

$$\Delta f \cdot L \fallingdotseq 2.2 \text{ GHz･cm}$$

である。ここで、Δｆは 3-dB 変調帯域幅を表わす。

一方、分布定数的に扱う範囲では、帯域幅は光波と変調波の伝搬速度の差、いわゆる速度非整合で制限され、進行波形の場合、$LiNbO_3$ では、

$$\Delta f \cdot L \fallingdotseq 6.7 \text{ GHz･cm}$$

である。

いずれの場合も、Δｆは電極長Ｌによって制限されるが、同一電極長では、 $LiNbO_3$ の例では、進行波形の帯域幅は集中定数形に比べて約３倍広帯域となる。

狭帯域動作では電極を共振形に構成して高周波動作を行なう。このとき、集中定数的に扱える範囲では、ＬＣＲ回路として扱い、中心周波数は回路のＬＣで決まり、ＬＣＲで決まる帯域をもつ特性となる。分布定数的に扱う範囲では、電極長Ｌと線路内波長λによって定在波の生じる条件で中心周波数が決まり、進行波動作と同様に光波と変調波（前進波）との速度非整合により能率が低下する。

２．３　$LiNbO_3$ 導波形光変調素子の試作・実験

２．３．１　$LiNbO_3$　ｙ板とｚ板

電気光学効果を利用した導波形光変調素子を作製するための基板材料として、 $LiNbO_3$ は、

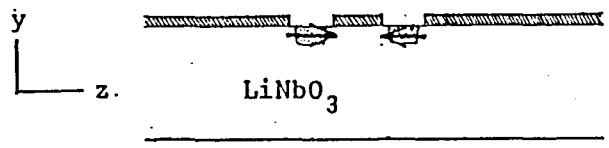
１．金属、とくに Ti 拡散によって特性の良い光導波路を得やすい。

２．電気光学（ポッケルス）定数が大きい。

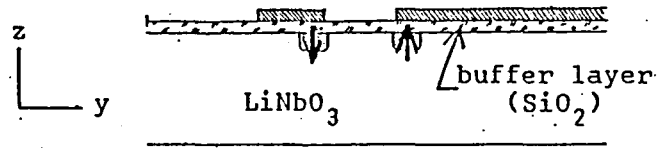
といった利点があるため、よく用いられる。

$LiNbO_3$ を用いた干渉形光変調素子の構成法は、高能率化のためにプッシュプル動作を行なう場合、図２．３に示す２種類がある。高速・高能率化および集積化を考慮すると、ｙ板に比べてｚ板を用いる方が有利であると考えて、本研究ではｚ板を用いている。

まず変調効率について考えると、同一電極間隔、電極幅、電極長を仮定し、各構成における光波と変調波の界分布の差異を無視した場合、必要な



（a）Y板使用の例



（b）Z板使用の例

図2．3　LiNbO3 干渉形光強度変調素子

変調電圧はほぼ等しい。しかし、y板の電極構成において、集中定数形では、電極容量がz板に比べて増加するため、変調帯域は狭くなる。進行波形においては、帯域は電極長によって決まるため、両者の帯域も等しいが、特性インピーダンスが低くなり、必要な変調電力が増大する。いずれの場合も、y板と比べてz板の電極構成の方が高能率となる。

次に各種素子を単一基板上に集積化する場合を考えると、分岐、曲がりその他の進行方向が結晶軸方向とは異なる光回路素子が必要になる。このとき、光導波路の特性がその進行方向によらず一定であることが望ましい。$LiNbO_3$ では、各軸方向の屈折率は、$Nx=Ny=No$、$Nz=Ne$ である。ここで、No、Ne はそれぞれ結晶の常および異常屈折率を表わす。y板では、基板面に垂直な偏波成分は常にNoを感じるが、水平成分は進行方向

によって、No～Neの範囲の異なった屈折率を感じる。したがって、光の進行方向によって光伝搬特性が異なってくる。一方、z板では垂直、水平成分は、それぞれ、常にNe、Noを感じるため、進行方向による光伝搬特性の差異は生じない。また電気光学定数のとくに大きいγ_{33}を有効に利用するためには、z方向の電界に対して、z方向の光波成分が必要である。y板では、進行方向によりこの成分の大きさが異なるが、z板では進行方向に依存しない。

2．3．2　素子の試作・実験

図2．4に試作した素子の構成を示す。低電圧で高い変調度を得るためには、電極間隔を狭くすることが望ましい。このとき、z板を用いたプッシュプル光変調素子構成では、必然的に平行導波路間隔も同時に狭くなる。ところが2本の平行導波路を接近させるとその間で光波の結合が生じ、第3章で詳しく述べるように、結果的に消光比が低下する。電極をマイクロ波用伝送線路として用いており、この線路の特性インピーダンスは電極間隔と電極幅の比で定まる。したがって、電極間隔を狭くすると、電極幅も

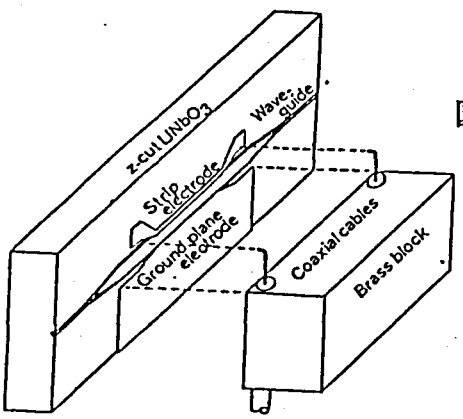


図2．4　高速導波形変調素子の構成

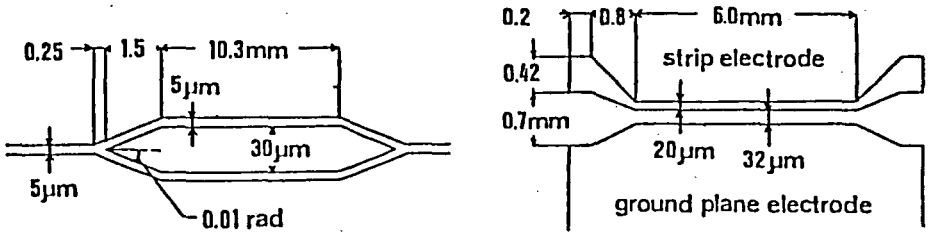


図２．５　試作素子の導波路及び電極パターン

表２．１　　作製条件

基板		$LiNbO_3$ z板 (5x21x0.5 mm^3)
光導波路		Ti 拡散
	Ti 膜厚	35 nm
	拡散温度	1010 °C
	拡散時間	7 h
	拡散雰囲気	アルゴン
バッファ層		SiO_2 (高周波スパッタ)
	膜厚	0.11 μm
電極		Al (抵抗加熱蒸着)
	膜厚	2.1 μm

同時に狭くなり、電極の電気抵抗が大きくなりマイクロ波特性が劣化する。素子の試作においてはこれらの光および電気回路の制限を考慮して設計を行なっている。図２．５に光導波路および電極パターンを示す。

付録１に示した方法を用いて素子を作製した。作製条件を表２．１に示す。素子の低周波における変調特性を表２．２に示す。

表２．２　半波長（スイッチ）電圧と消光比

	TM−mode	TE−mode
半波長電圧（V）	8．8	11．9
消光比（dB）	17	15

使用波長：λ＝633 nm

半波長電圧は、同一電極構成を用いて作製した直交ニコル形の変調素子（半波長電圧： 23 V ，消光比：15 dB ） [6]に比べて、大幅に低下できている。

付録２に示した方法を用いて高周波変調特性を測定した結果を図２．６に示す。変調電力 100 mW に換算したパーセント変調度を示している。3-dB変調帯域幅Δｆは 11.5 GHz ，単位帯域幅当たりの変調電力および変調電圧は、それぞれ、Ｐ／Δｆ＝ 11.3 mW/GHz、Ｖ／Δｆ＝0.77 V/GHz である。

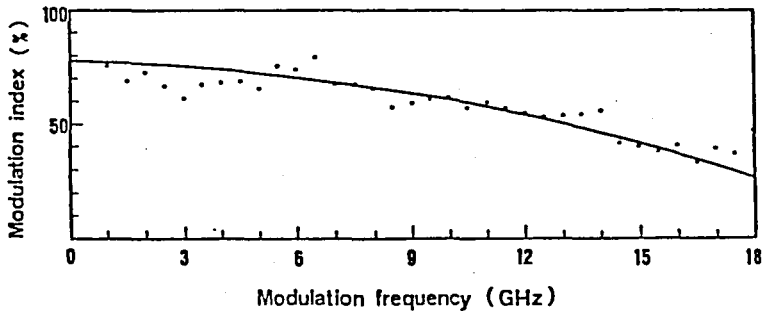


図２．６　試作素子の周波数特性

２．４　結言

本章では、干渉形光変調素子の動作原理について基礎的な説明を行ない、それに基づいて、 $LiNbO_3$ 基板を用いた素子を作製して行なった変調実験の結果について述べた。

１次電気光学効果を用いた光強度変調素子として、Ｙ分岐を用いた干渉形変調素子は、単純な構成で安定な動作が得られるため、変調器単体として、また光集積回路の構成素子として適当なものであると考えて $LiNbO_3$ ｚ板を基板に用いた干渉形光変調素子を試作した。その結果、

(1) 同一電極を用いた直交ニコル形（半波長電圧：23 V）に比べて、ＴＭモードにおいて、8.8 V と大幅な半波長電圧の低下がなされた。

(2) 6 mmの電極長で、3-dB変調帯域幅Δｆは、11.5 GHzと理論値によく一致した広帯域な特性を得た。

$LiNbO_3$ ｚ板を用いた干渉形光変調素子をさらに高速・高能率なものとするためには、

(3) 低電圧化を図るために電極間隔を狭くすると平行導波路間の光波干渉により消光比が劣化する

(4) 進行波動作の場合、光波と変調波との速度非整合のため、変調帯域が制限される（$\Delta f \cdot L \fallingdotseq 6.7$ GHz･cm ）

といった問題点を解決することが望まれる。

第３章　干渉形光変調素子の高能率化

３．１　序言

本章では、干渉形光変調素子の高能率化について考察を行なう。まず、素子を構成する光回路および電気回路に関して、変調特性に影響を与える要因を明らかにする。光回路については、導波路を伝搬する高次モードおよび平行導波路間での光の結合による影響を考察する。電気回路については、進行波動作による変調を行なう場合、本質的に変調周波数特性を制限する要因である光波と変調波の速度非整合、さらに実際に電極を構成する場合に生じる伝送線路の損失、インピーダンス不整合の影響について述べる。

次に、素子の高能率化のためには、導波路間の光の結合の減少および速度非整合の改善が重要であるという観点から、平行導波路間に微小な溝を形成することにより、この光の結合を減少させると同時に速度非整合を改善する方法を提案し、それぞれ実験および数値解析によりその効果を確認した結果について述べる。

これまでに、平行導波路間にイオンビームエッチングを用いて溝を形成し、　導波路間での光の結合を抑えた干渉形光変調素子が報告されている[33]。筆者は、平行導波路間の溝によって光の結合を減少させることに加え、進行波動作変調素子における速度非整合改善効果に新たに着目している。

最後に、電極間に反応性イオンエッチングを用いて溝を形成した変調素子を $LiNbO_3$ 基板を用いて作製し、実験により高能率な素子となることを確認した結果について述べる。

３．２　干渉形光強度変調素子の設計における問題点

３．２．１　導波路伝搬モードの影響

干渉形光変調素子を構成する各光導波路は、通常、基本モードのみを伝搬する特性であることが要求される。2.2.1節で示したように、出力側の導波路Ｙ分岐の特性は位相変調を強度変調に変換する部分として特に重要である。図３．１に出力Ｙ分岐付近での光波のふるまいを示す。Ｙ分岐では同図(a) に示されるように、２本の入力導波路に同位相で入射した光波は、分岐部を経て出力導波路の基本モードとして伝搬する。一方、入射する一組の光波が逆位相の場合、それらは分岐部で高次モードに変換され、基本モードのみが伝搬する出力直線導波路で遮断される。その結果強度変調出力を得る。したがって、この直線導波路がわずかでも高次モードを伝搬すれば、素子の消光比は劣化する。ここでは高次モードとして１次モードを考え、それ以上の次数を持つモードは完全に遮断されると仮定する。

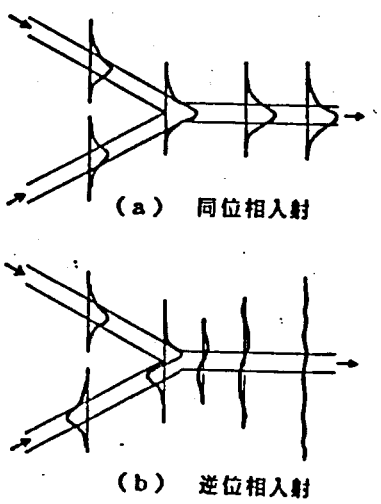


図３．１　Ｙ分岐による合波出力部での光波のふるまい

高次モードの遮断は伝搬過程において突然生じるものではなく、図３．１に示すように、進行につれて光波を導波路外に放射しながらある距離を伝搬した後には、導波路内に高次モードの光エネルギーが存在しなくなるものである。導波路が高次モード遮断条件を十分に満たしている場合には、通常、光の導波路内波長の数倍から数十倍の距離でこの状態となる［38］。

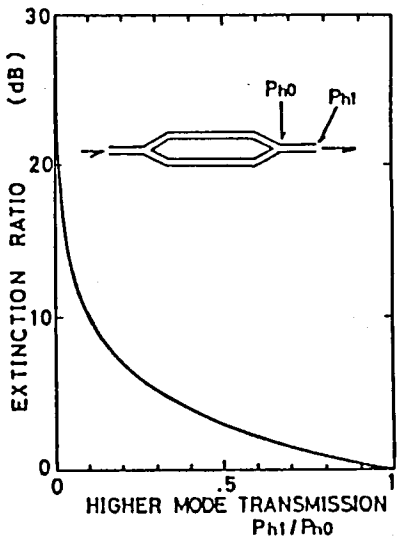


図３．２　高次モードの消光比への影響

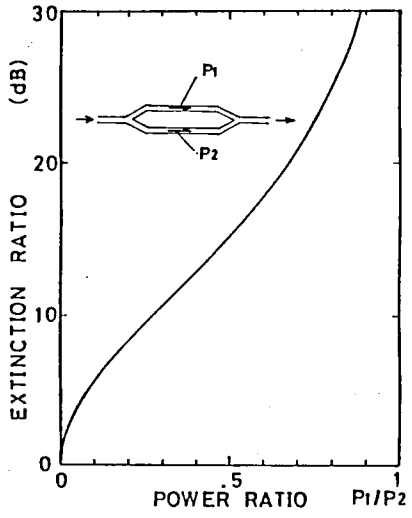


図３．３　分波比による消光比の変化

しかし、高次モードの伝搬定数が遮断点付近にあるような導波路特性では、その距離は長くなる。したがって、導波路が高次モードを本来伝搬させない特性であっても、直線導波路の長さが不十分な場合には変調素子の消光比は劣化する。図３．２に高次モードの消光比への影響を示す。横軸は出力側Ｙ分岐における結合部分すなわち出力導波路開始点での高次モードの光電力P_{h_0}に対する出力端での導波路内に存在する高次モード光電力P_{h_1}の比を表わしている。これより、20 dB 以上の消光比を得るには出力部での高次モード光電力が 1/100以下に減衰していなければならないことがわかる。　対称Ｙ分岐に関して、消光比を劣化させる要因としては、分岐比の不完全性がある。干渉形の場合、干渉しあう両光波の振幅が等しいときに完全な消光比が得られる。したがって、導波路Ｙ分岐の特性が不十分で

各分枝での光振幅が等しくない場合には、消光比が劣化する。図３．３に分岐比と消光比の関係を示す。ここでは、入力側分岐だけが不完全で、出力側は完全に対称である場合を仮定している。20 dB 以上の消光比を得るためには、分岐比P_1／P_2 は 0.66 以上であればよい。

３．２．２　平行導波路間における光の結合の影響

次に、平行導波路間で生じる光の結合が消光比に与える影響を考察する。２本の平行導波路間に光の結合が生じると消光比が劣化する。
特に $LiNbO_3$ z 板を用いたプッシュプル動作変調素子の場合は、2.3.1 で述べたように導波路間隔と電極間隔が直接関係しているため、変調電圧を低減するために電極間隔を狭めると必然的に導波路間隔も狭まり光の結合が増大する。その結果消光比が劣化する。

出力光の複素振幅をe_{A0}、本来Ｙ分岐で放射される光に対応する仮想的な光振幅をe_{A0}とし、
入力光振幅を$\mathcal{e}_i = (1, 0)^t$、出力光振幅を$\mathcal{e}_o = (e_{A0}, e_{A0})^t$とすると、付録４の表式をもちいて、入出力関係は次式で表わされる。

$$\mathcal{e}_o = Y_s^{-1} \cdot P_m \cdot Y_s \cdot \mathcal{e}_i \qquad (3-1)$$

ここで、Ｙｓ、Ｐｍはそれぞれ入力側Ｙ分岐および位相変調部の入出力関係を表わす行列である。出力側Ｙ分岐は入力Ｙ分岐を反転したものであるので、その入出力関係を表わす行列はＹｓの逆行列Y_s^{-1}で表わされる。

したがってＹ分岐からの出力光強度は、次式で表わされる。

$$I_o = |e_{A0}|^2 / 2$$
$$= 1 - [\delta^2 / (\delta^2 + C^2)] \cdot \sin^2 (s \cdot L) \quad (3-2)$$

ただし、

$\delta = \Delta\beta / 2$

$\Delta\beta$：変調により生じる両導波路の位相定数差

$s = \sqrt{\delta^2 + C^2}$

図３．４に平行導波路間の結合の強さＣ・Ｌに対する消光比の変化を示す。

例えば、平行導波路間が3-dB方向性結合器として動作する程度の結合状態（Ｃ・Ｌ＝π/4）では、消光比は約 6 dB となり、20 dB 以上の消光比を得るにはＣ・Ｌ＜π／20を満足する必要がある。

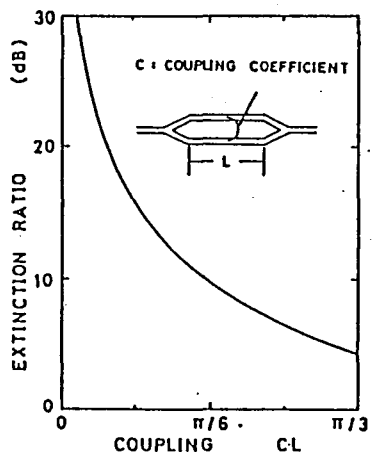


図３．４　平行導波路間での
光の結合と消光比

３．２．３　進行波動作における電極特性と変調特性

進行波動作における変調帯域幅の制限要因は、基本的には、光波と変調波の速度非整合である。これは基板材料の誘電率および電極構造によって定まる。光波と変調波に対する誘電率は材料固有のものであり、両者は一般に異なる値である。速度非整合によって制限される帯域幅は次式で表わされる。

$$\Delta f \cdot L = 1.4c / (\pi \cdot |N_m - N_\ell|) \qquad (3-3)$$

L：電極長
c：真空中での光速
N_ℓ：光波に対する等価屈折率
N_m：変調波に対する実効屈折率

ここでは、伝搬定数βと真空中での波数k_0との比β / k_0を光導波路の場合には等価屈折率、マイクロ波では実効屈折率と呼ぶ慣習に従った。

$LiNbO_3$を用いた平行平面電極構造の変調素子を例にとると、$N_m \fallingdotseq 4.2$、$N_\ell \fallingdotseq 2.2$であり、このとき　$\Delta f \cdot L = 6.7$ GHz･cmである。　素子を広帯域化するには、電極長Lを短くすればよいが、帯域と同様に変調電圧VはLに反比例するために、変調電圧は高くなる。逆に変調電圧を下げるためにLを長くするとΔfは小さくなり、いずれにしろ変調素子の性能を示す一つの目安である$V / \Delta f$は変化しない。したがって、本質的に素子を高能率化するには、なんらかの方法で速度非整合を改善する必要がある。

進行波形では電極を変調波の伝送線路として用いるため、伝送線路とし

ての特性が、実際の変調能率に大きく影響する。図３．５～図３．７に第２章と本章での試作素子をモデルに電極長Ｌ＝6 mmとして計算した変調周波数特性を示す。損失αの値は 1 GHzに対するもので表わしており、αの周波数依存性は$\sqrt{f}$に比例していると仮定した。

図３．５は、伝送損失をパラメータとしてインピーダンス整合がとれている場合を仮定して計算したものである。明らかに伝送損失の変調帯域に与える影響は大きく、無損失で 12 GHz 近い帯域幅が損失α＝2 dB/cm では 8 GHz、α＝4 では 5 GHzまで低下する。

図３．６は線路の特性インピーダンスと電源および負荷インピーダンスとの不整合の影響を示している。インピーダンス整合がとれなくなると線路両端での反射の影響で周波数特性が平坦ではなくなり、とくに低インピーダンスでは帯域の低下が著しくなる。

図３．７は速度非整合を改善し、N_m ＝ 3.8まで改善しているが、インピーダンス整合していない場合である。インピーダンス整合がとれ、線路の損失がなければ、本来 20 % 程度の帯域幅改善ができる。しかし、いままでに示したN_m ＝4.2 の場合と比べて明らかなように、たとえ、速度非整合がある程度改善されても、線路と外部回路とのインピーダンス整合および線路の損失を十分考慮しないと広帯域化にあまり効果が得られないことを示している。

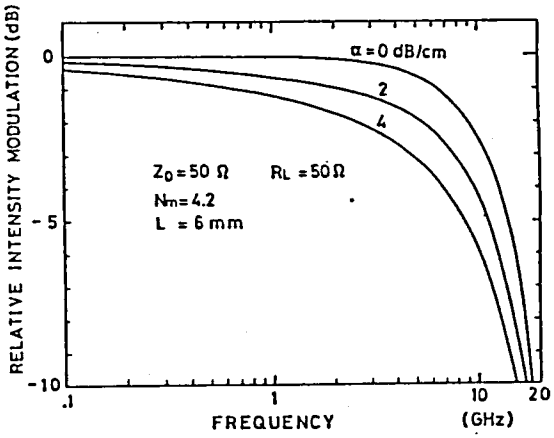


図３．５　伝送損失の
変調特性への影響

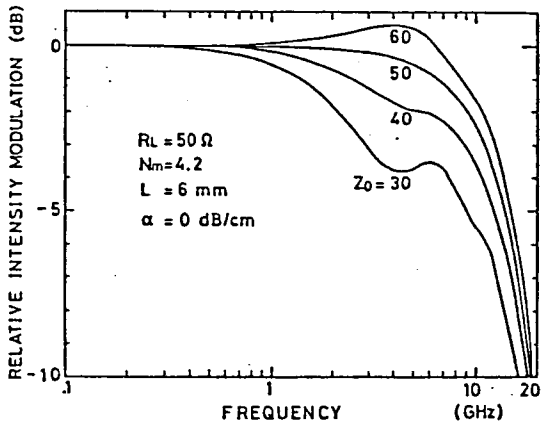


図３．６　特性インピーダンス
の変調特性への影響

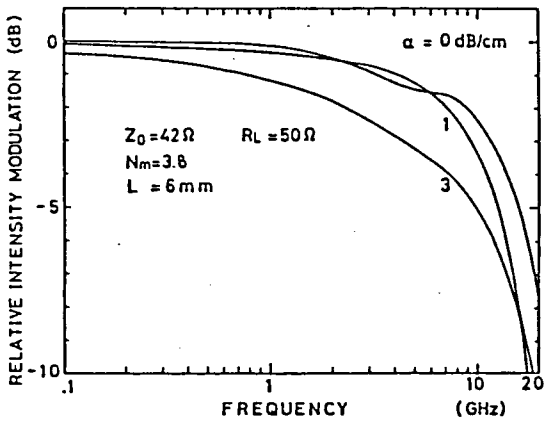


図３．７
インピーダンス不整合及び
伝送損失による
変調特性への影響

３．３　干渉形溝付光変調素子

３．３．１　素子の構成

図３．８に素子の構成を示す。直線導波路に入射した光波は対称Ｙ分岐により分岐され、その後、平行な２本の導波路上に設けられた電極間の印加電界によりそれぞれ位相変調を受ける。このとき、各光導波路内では基板面垂直方向の電界は、互いに逆向きになり、各光波は逆符号の位相変化を受け、いわゆるプッシュプル動作となっている。これらの光波は出力部の非対称Ｘ分岐[35,36] を通じて干渉・分割され、２つの出力導波路から出力される。この非対称Ｘ分岐は通常のマッハ・ツェンダー干渉計におけるハーフ・ミラーと同様な働きを行い、２本の導波路からは互いに相補的な光出力を得る。従ってこの素子は光強度変調および１×２光スイッチ素子として動作する。 3.2.1でのＹ分岐の場合に示した高次モードの影響はＸ分岐の非対称側分岐の非対称性の度合いに対応し、分岐比の影響はそのまま対称側分岐の分岐比すなわち対称性に対応する。

このような干渉形光強度変調素子では、3.2.2 で示したように位相変化

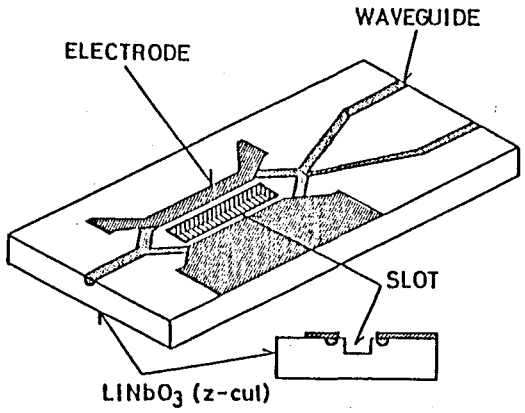


図３．８　進行波動作
干渉形溝付光変調素子

を受ける２本の平行導波路を伝搬する光波間の結合が消光比の劣化の大きな要因となる。したがって十分な消光比を保つためには、導波路間隔を狭めることが困難となり、小形化・高能率化のさまたげとなる。そこで図３．８に示したように導波路間に微小な溝を設けることにより光波間の干渉を減少させることが可能となる。

３．３．２　溝による消光比改善効果

分岐干渉形光変調素子における導波路間隔と消光比の関係および導波路間の溝による改善効果を実験的に確認した。測定用素子は同一基板上に２本の平行導波路の長さが 8 mm 導波路間隔が 5～ 12 μmの５種の変調素子を同一条件で作製したものを３枚用意した。それぞれは２本の導波路間に溝を形成しない通常のもの，1.5 μmおよび3 μmの溝をもつものとした。図３．９は導波路間の溝の深さをパラメータとし、導波路間隔に対する消光比の変化を波長 0.63 μmの光源を用い、ＴＥモードで測定したものである。3 μmの深さの溝を形成することにより、溝の無い通常の素子と比べて消光比が約 7 dB 向上している。また 20 dBの消光比を得るのに溝が無い場合、導波路間隔を 12 μm以上とる必要があるのに対し、3 μmの溝を形成することにより 8μm程度まで接近させることができる。TMモードの場合もほぼ同様な傾向を示す。

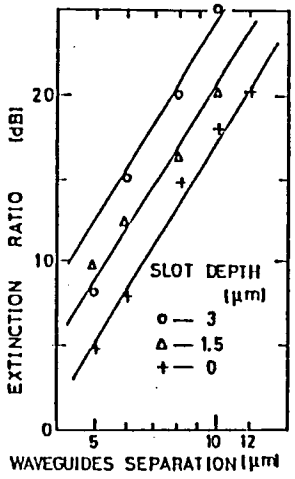


図３．９　導波路間隔及び溝の深さによる消光比の変化

３．３．３　溝による速度非整合改善効果

次に、溝を形成することによる速度非整合改善効果について述べる。進行波動作による変調を行った場合、 $LiNbO_3$ 上の平面電極構造では、光波および変調波の感じる屈折率は、それぞれ、 $N_\ell = 2.2$（波長 633 nm），$N_m = 4.2$である。このとき進行波動作による変調帯域幅は、3.2.3 の式（３－３）で与えられる。ここで電極間の基板に溝を設けることにより、変調波は $LiNbO_3$ に比べて低誘電率な空気をより多く感じるため、実効屈折率が低下する。電極線路を伝搬する変調波は混成モードであるが、簡単のためＴＥＭ波近似を行ない静電界として解析をおこなった。図３．１０に 200×200 の領域に分割して緩和法を用いた数値計算例を示す。計算に際しては電極膜厚およびバッファ層を無視している。形成する溝が深くなるにつれて実効屈折率N_mの低下するようすがわかる。このときの帯域幅の変化を図３．１１に示す。溝の深さ4 μm で20 %，6 μm で 30 % 程度の向上が期待できる。帯域を制限する要因には、速度非整合以外に実際上、インピーダンスの不整合や伝搬損失が影響する。図３．１２には一定の溝深さに対して電極幅の変化による実効屈折率および特性インピーダンスの変化の計算例を示す。溝がない場合、例えば 50 Ωの特性インピーダンスを得るためには、電極幅は電極間隔の 0.6倍程度にする必要があるのに対し 4 μmの溝では 1.0　倍となり、電極幅を広くできるため伝導損の低下も可能となる。

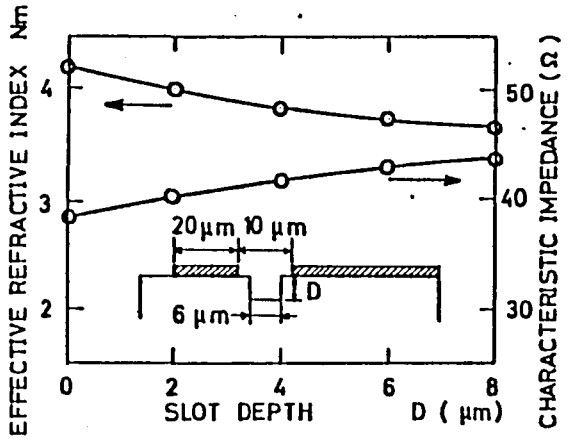


図３．１０　溝の深さによる
実効屈折率及び
特性インピーダンスの変化

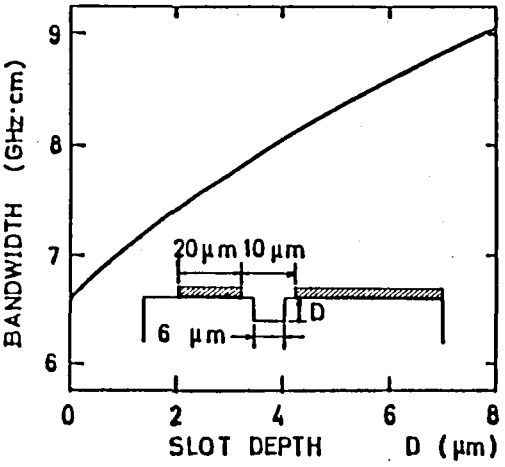


図３．１１　溝の深さと変調帯域幅

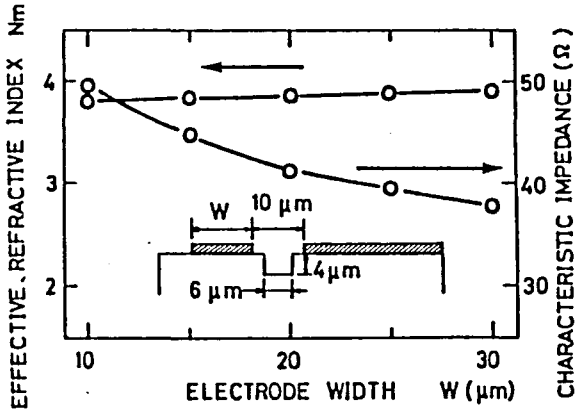
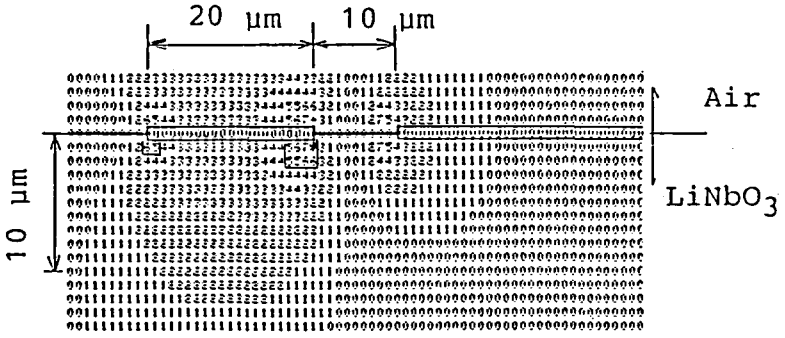


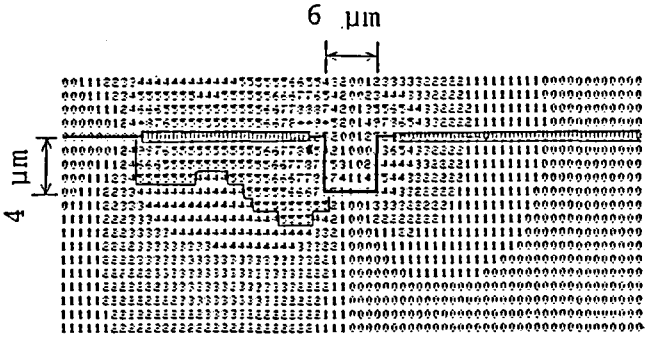
図３．１２　電極幅による
等価屈折率及び
特性インピーダンスの変化

３．３．４　溝による変調電界分布の変化

形成された溝の影響で、導波路に加わる有効電界が低下するという問題が考えられる。図３．１３に同一電極間隔，幅で溝の無い通常のもの（a）および4 μmの溝を形成したもの(b) の基板垂直方向の電界分布を示す。それぞれの線路電極内側、電極直下の電界の値を参照値（図で＊で表わしている）を 10 とし、他の部分の電界の大きさを示している。この参照値は基板断面内でのほぼ最大値と考えられ、溝のある場合は無い場合の値の約 70 %に低下している。しかし、電界分布の変化に着目すると、最大値から



（a）溝なし



（b）溝付

図３．１３　電界分布

1/2の値に低下する範囲（図において、５以上の数値で表わされている部分）は横方向，深さ方向それぞれ（a)では　3 μm，2 μmであるのに対し、(b）では 21 μm，6 μmと大幅に広がっている。これらのことは溝を形成した場合には変調に寄与する有効電界がわずかに低下するが、電極と光導波路との位置ずれに対する許容度が大きくなることを示している。

以上のことから平行導波路間に溝を形成することにより、溝が無い場合と比べて、同一消光比を得るために必要な導波路間隔が狭まり、さらに速度非整合の改善効果を伴うことにより、全体としてより高能率な変調素子の作製が可能であると期待できる。

３．４　素子の設計と試作

図３．１４に素子の具体的寸法を示す。作製には、まず、 $LiNbO_3$ z板上に反応性イオンエッチングを用いて溝を形成し、その後 Ti 熱拡散による光導波路形成をおこなった。その後、導波路上に直接金属を装荷することによる光の伝搬損失を低減するため、 SiO_2 バッファ層を介して Al 電極を形成した。

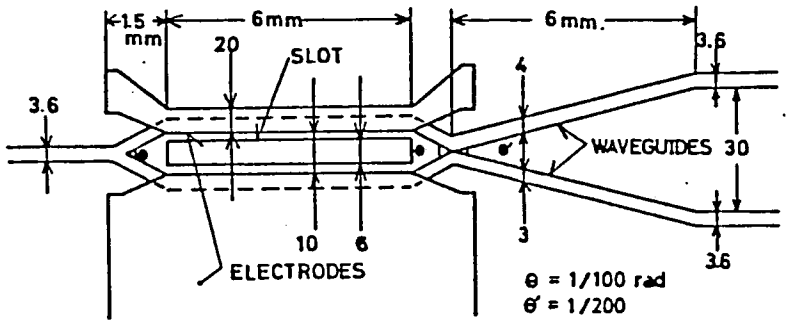


図３．１４　試作素子の導波路及び電極パターン

$LiNbO_3$ 基板エッチングマスクには7㎛厚の Al を用いて、連続5時間エッチングにより深さ 4.3㎛の溝を形成した。このとき、エッチング条件は、CF_4 50 cc/min、 0.025 Torr、入力電力200 W で、エッチングレートは 15 nm／min であった。溝を形成した基板上に付録1の方法で光導波路を作製した後、バッファ層および電極を形成した。それらの作製条件を表3．1に示す。 SiO_2 スパッタ膜をバッファ層とした場合、いわゆるＤＣドリフトが顕著に現われる[39]。これを低減するため、電極間隔部分には SiO_2 が存在しないようにパターン化している。電極幅は 10 ㎛ および 20 ㎛のものを作製した。図3．15に電極幅 10 ㎛の素子のＳＥＭ写真を示す。この場合の電極膜厚は，2.2 ㎛である。

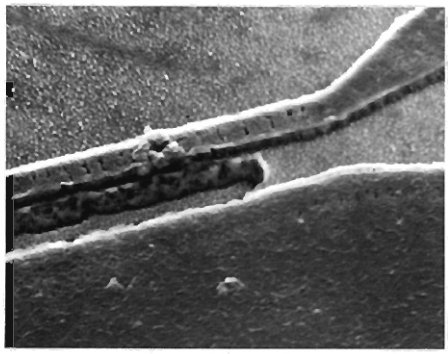


図3．15　試作素子のＳＥＭ写真例

3．5　変調実験

電極幅の異なる2種の素子を用いて実験を行なった。まず、速度非整合の改善効果を確認するために、ＴＤＲを用いて、電気信号の電極線路伝搬時間の測定を行った。電極長 6 ㎜ に対して溝が無い場合および4.3 ㎛の溝がある場合、それぞれ伝搬時間は 85 psおよび 75 psであった。これらは変調波に対する実効屈折率に変換するとN_m=4.2および 3.8に対応し、図3．10に示す計算結果にほぼ一致するものである。このことから、変

表３．１　作製条件

基板		$LiNbO_3$ z板 (5x25x0.5 mm^3)
光導波路		Ti 拡散
	Ti 膜厚	27 nm
	拡散温度	980 °C
	拡散時間	4.5 h
	拡散雰囲気	酸素
バッファ層		SiO_2 (高周波スパッタ)
	膜厚	80 nm
電極		Al (電子ビーム蒸着)
	膜厚	3 μm
溝		反応性イオンエッチング
	エッチングガス	CF_4 50 cc/min
	圧力	0.025 Torr
	パワー	200 W
	時間	5 h

調帯域幅は電極長 6 mm で変調波の伝搬損失を無視すると、溝が無い場合における 11 GHz から 13.3 GHz と約20% の改善が期待できる。

変調波の伝搬損失は電極幅 20 μmの素子では周波数の上昇に伴い 2 GHz で 2 dB 、10 GHzで 5 dB と次第に増加する。電極幅 10 μmでは、10 GHz

で 10 dB以上の損失が見られたため、以後の実験は、電極幅 20 μmのものを用いた。

作製した素子の半波長（スイッチ）電圧は波長633 nmにおいて、ＴＥ、ＴＭモードに対して、それぞれ、7.5 Ｖ，３Ｖであった。溝の深さと消光比の関係を調べた結果（図３．９）からは、4 μm以上の深さの溝では、消光比 25 dB以上が期待されるが、作製した素子では，約 18 dBであった。これは素子の導波路特性がわずかながら高次モードを導波するような特性であったためと考えられる。

最後に、付録２に示す方法を用いて素子の変調周波数特性の測定を行なった。図３．１６に測定結果を示す。丸印が測定点で、実線は実効屈折率 $N_m = 3.8$ で、伝搬損失を無視した場合の理想的特性を示す。　測定した 3-dB 帯域幅は約 12 GHz であり、このとき変調素子の性能を表わす目安としての単位帯域幅当たりの変調電力あるいは変調電圧は、　それぞれ、

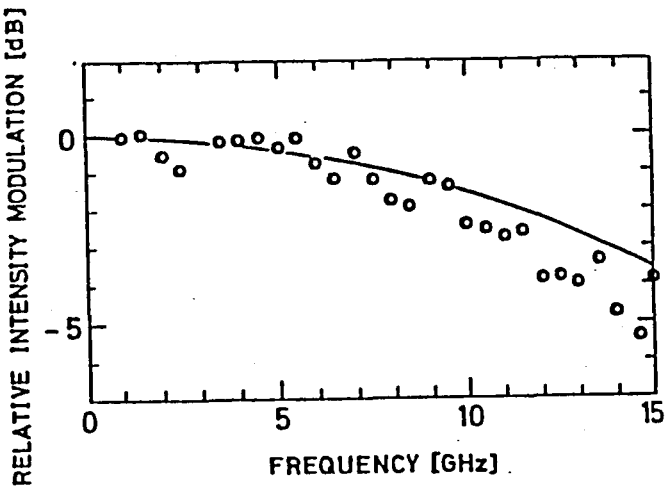


図３．１６　試作素子の変調周波数特性

P／Δf＝4.2 mW/GHz、V／Δf＝0.25 V/GHzであった。帯域幅は理想的には、13.5 GHz程度と見積もられるのに対し、実際の電極における伝導損びインピーダンス不整合（実験では、電源および負荷の 50 Ωに対し、変調電極は 40 Ω）により少し値が小さくなっている。しかし溝の無い場合の約 11 GHz という値と比べて向上が確認された。単位帯域幅当たりの変調電力および変調電圧は溝の無い場合の値の　P／Δf＝ 12 mW/GHz、V／Δf＝0.77 V/GHz[24]に対して、同じ電極長でありながら、電極間隔の狭小化および速度非整合の改善により大幅な向上が見られた。表３．２に、この素子と第２章で試作した素子との特性を比較して示している。

表３．２　２章と３章の変調素子の比較

	本章の素子	２章の素子
電極長　（mm）	６	６
電極間隔　（μm）	１０	３２
特性インピーダンス（Ω）	４０	５０
半波長電圧（V）	３	８．８
消光比（dB）	１８	１７
3-dB帯域幅（GHz）	１２	１１．５
P／Δf　（mW／GHz）	４．２	１１．３
V／Δf　（V／GHz）	０．２５	０．７７

使用波長：λ＝633 nm,　TMモード

3．6　結言

以上、干渉形光変調素子の特性に影響を与える要因について考察し、平行導波路間の光の結合を抑えると同時に速度非整合を改善する方法として、平行導波路間に溝を形成する構成を提案し、試作・実験によりその効果を確認した。ここで得られた結果を以下にまとめる。

1)　干渉形光変調素子において、消光比に影響する要因には導波路を伝搬する高次モードおよび平行導波路間の光の結合がある。20 dB 以上の消光比を得るには、計算によると、上記の各要素が単独して影響する場合、高次モードを -20 dB 以下に、分岐比を 0.66 以上に、光の結合は結合係数と相互作用長の積　C・Lをπ／20以下とする必要がある。

2)　$LiNbO_3$ z板を用いた干渉形素子では高能率化のために電極間隔を狭めると平行導波路間も狭まり光の結合によって消光比が劣化する。光波長 633 nm で単一モードとなるTi拡散 $LiNbO_3$ 導波路を用いた素子で 20 dB 以上の消光比を得るには 12 μm程度以上の間隔が必要であり、6 μmでは8 dB以下に低下することを実験により確認した。

3)　導波路間に3 μmの深さの溝を形成した場合には、7 dB程度の消光比の向上が見られ、間隔8 μmで20 dB 以上、6 μmでも 15 dB以上の消光比が得られることを実験により確認した。

4)　電極間隔 10 μm、電極幅 20 μm、の非対称電極を使用した場合には、電極間、基板内に幅6 μm、深さ約4 μmの溝を形成することによりその変調波に対する実効屈折率は溝がない場合の値の 4.2から 3.8まで低下することを数値計算および実験によって確認した。

5)　変調実験では、3-dB帯域幅 12 GHz 、半波長電圧 3 V、単位帯域幅当

たりの変調電力および変調電圧はそれぞれ、 $P/\Delta f = 4.2$ mW/GHz, $V/\Delta f = 0.25$ V/GHzという広帯域・高能率な結果を得た。

第４章　干渉形変調素子の集積化

４．１　序言

前章までは、変調素子単体を取り扱って来た。変調素子を導波形として構成する意義は、従来のバルク形に比べて高能率・高速なものが実現できる点とともに、それを単一基板上に集積化することによって、新たな応用が期待できる点にある。これまでに、光スイッチ・マトリックス［20］、ＡＤ変換器［18,19］、光サンプラ［14,40］、光論理回路［22］などいくつかの応用が提案されている。これらの機能を実現するためには、素子単体の性能向上はもとより、集積化することにより新たに生じる問題を把握する必要がある。

本章では、まず、干渉形光変調素子を単一基板上光波伝搬方向に縦続接続した場合について、前段の素子から伝搬する光波モードが次段の素子に与える影響を考察する。この結果に基づき、変調素子の縦続接続することにより構成した光信号相関器の試作・実験の概略を述べる。次に、素子を光波伝搬方向に対して平行に並列集積化した場合に生じる素子間における光学的、電気的干渉について計算および実験により検討している。

４．２　干渉形光変調素子の縦続接続

４．２．１　高次モードによる変調特性への影響

図４．１に２個の干渉形光変調素子を縦続接続したようすを示す。前段素子の出力用と後段素子の入力用導波路を接続している。個々の変調素子の透過特性は、それぞれの印加電圧による誘導移相量をΓ_1、Γ_2とする

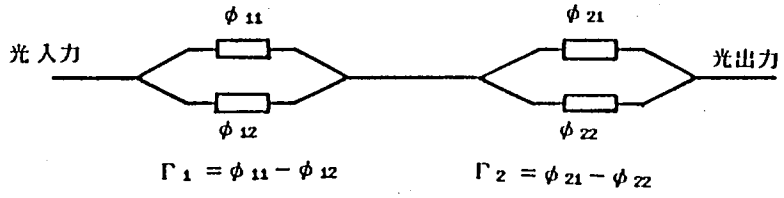


図4．1　変調素子の縦続接続

と、理想的には、

$$T_1\ (\Gamma_1) = \cos^2\ (\Gamma_1 / 2) \qquad (4-1)$$

$$T_2\ (\Gamma_2) = \cos^2\ (\Gamma_2 / 2) \qquad (4-2)$$

で表わされる。このとき全体の透過特性は、

$$T\ (\Gamma_1, \Gamma_2) = \cos^2\ (\Gamma_1 / 2) \cdot \cos^2\ (\Gamma_2 / 2) \qquad (4-3)$$

となり、各素子の透過特性の積となる。すなわち、初段素子に連続光を入射したとき、後段からの出力は各素子の誘導移相量に対応する強度変化の積を得る。

この動作を得るためには、接続部の直線導波路が重要な働きをする。変調素子単体では、出力導波路を伝搬する高次モードは消光比の劣化として影響するが、変調電圧に対応する出力光強度変化の形には影響を与えない。ところが、２つの素子を接続した場合には、期待した動作そのものが得られなくなる。

接続部の直線導波路が高次モードをも伝搬する場合、その出力変化は次

のように表わされる。（付録４参照）

$$T(\Gamma_1、\Gamma_2)=k_1\cdot\cos^2(\Gamma_1/2)\cdot\cos^2(\Gamma_2/2)+k_2\cdot\cos^2[(\Gamma_1+\Gamma_2)/2]-k_3\cdot\cos^2[(\Gamma_1-\Gamma_2)/2] \qquad (4-4)$$

各変調素子における誘導移相量に対して、それぞれに対応する強度変化の積、両者の和および差に対応する強度変化を表わす３つの項に分かれる。高次モードが接続部の直線導波路を伝搬する割合に対するそれぞれの項の係数（k_1，k_2，k_3）の変化を図４．２に示す。

接続部において、高次モードが完全に遮断される場合には、$k_1=1$，$k_2=0$，$k_3=0$　となり、積項のみが残り、はじめに示した動作を行なえるが、わずかでも高次モードが伝搬すると、k_2，$k_3\neq0$　となり、各変調素子の誘導移相量の和および差に対応する光強度変化を生じる。

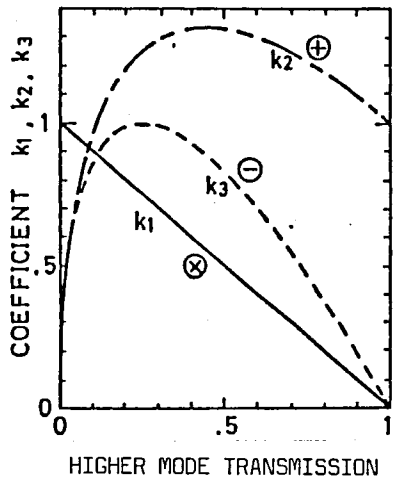


図４．２　高次モードによる変調特性への影響

変調素子単体では、第３章に示したように、高次モードの割合が-10 dB程度で 10 dB程度の消光比をとれるが、縦続接続では、k_2 , k_3 が k_1 と同程度になり、期待する動作を得られない。積項に対する他項の割合を-10 dB以下にするには、高次モードの割合を-30 dB以下にする必要がある。これは変調素子の消光比劣化が高次モードのみによる場合ならば、単体素子の消光比が 30 dB以上なければならないことを意味する。

干渉形変調素子の消光比の劣化の原因は、第３章に示したように高次モードの影響以外に入出力分岐の光分岐比の影響がある。この場合には、今まで示したような動作に対する悪影響は少なく、前段および後段の強度変化の積を出力光として得る動作が行なえる。

したがって、干渉形光変調素子を縦続接続する場合には、特に接続用導波路の伝搬特性が重要であり。完全に単一モード化されていなければならない。さらに、接続部が短い場合には、遮断された高次モードが基板内に十分放射されない間に後段の導波路に再び結合することが考えられる。このときも、高次モード伝搬によるものと同様な影響を与える。

４．２．２　集積化光信号相関器の試作・実験

次に、 $LiNbO_3$ 基板を用いて２つの干渉形光変調素子を縦続に接続した光信号相関器の試作および動作実験について示す。

図４．３は光相関器の動作原理図である。4.2.1 で示したように変調電気信号に対応する２種の光強度変

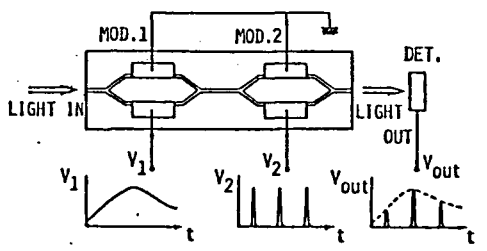


図４．３　集積化光信号相関器

表４．１　光強度変調素子の縦続接続で可能な信号処理例

光学バイアス Mod．1	光学バイアス Mod．2	検出器の応答速度	可能な信号処理例
λ／4	λ／4	高速	乗算
λ／4	λ／4	低速	相関
λ／4	0	高速／低速	サンプリング
0	0	高速	AND　$(A \cap B)$
0	λ／2	高速	／　$(A \cap \overline{B})$
λ／2	λ／2	高速	NOR　$(\overline{A \cup B})$

化の積が光出力として得られる。図示のように一方に未知の電気信号、他方に短パルス信号を印加すると、信号サンプラとして動作する。また、光検出器に応答速度の遅いものを使用すると２つの電気信号に対応するそれぞれの光強度変化間の相関を光出力として得ることになる。各素子の光学バイアス点および使用する光検出器の応答速度を適当に選べば、その他種々の信号演算が可能である。表４．１に動作可能な信号演算例を示す。

図４．４に試作に用いた導波路および電極パターンを示す。変調素子の一方は集中定数動作形、他方は進行波動作形の電極構造とし、それぞれに光学バイアス設定用の電極を別に設けている。導波路幅は高次モードを十分に遮断するために3 μmにしている。素子の作製には付録１に示す方法を用いた。作製条件を表４．２に示す。試作した各素子の基本特性を表４．３に示す。周波数特性は付録２に示す方法を用いて、周波数の変化に対する変調度の変化を測定した。進行波動作の素子では、パルス変調すること

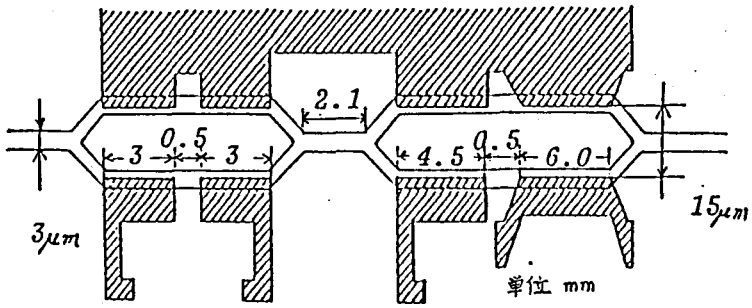


図4．4　試作素子のパターン

表4．2　　作製条件

基板		$LiNbO_3$ z板　（5x31x0.5 mm^3）
光導波路		Ti　拡散
	Ti 膜厚	25 nm
	拡散温度	980 °C
	拡散時間	4.5 h
	拡散雰囲気	酸素
バッファ層		SiO_2（高周波スパッタ）
	膜厚	0.08 μm
電極		Al　（電子ビーム蒸着）
	膜厚	2.1 μm

表４．３　各変調素子の基本特性

	集中定数形素子	進行波形素子
半波長電圧（Ｖ）	１５	８．５
消光比（ｄＢ）	１８	１９
3-dB帯域幅（ＧＨｚ）	３．２	１１．５ [1]
パルス応答[2]　（ｐｓ）		５２

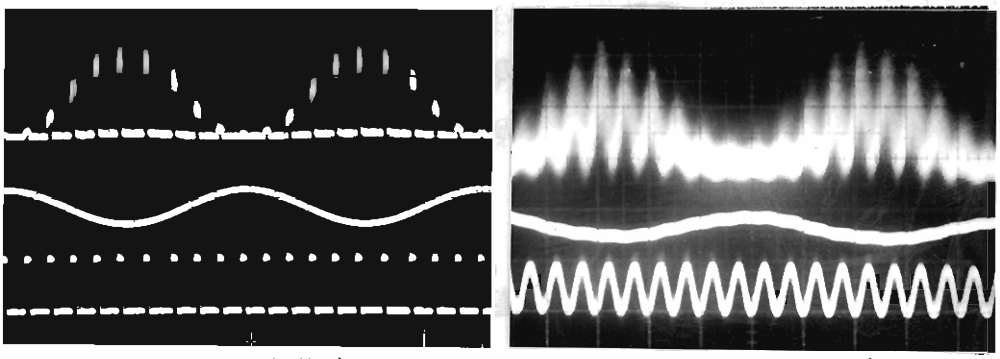
使用波長：λ＝633 nm,　ＴＥモード

1 計算値

2 半値全幅 62 ps，電圧 9 Vの電気パルスで変調したときの出力光パルス半値全幅

を考慮して付録３に示す方法を用いてパルス応答を測定した。

図４．５に信号掛け算実験の結果を示す。　(a) は繰り返し周波数 500 kHzの方形パルスと50 kHzの正弦波を、(b) では、100 MHz および 10 MHzの正弦波を各素子に印加した例である。いずれも、図４．１に示した動作をよく行なっているようすを示している。



(a) 上から出力光強度，50 kHzの正弦波，繰り返し周波数 500 kHzの方形パルス

(b) 上から出力光強度，10 MHz および 100 MHzの正弦波

図４．５　信号乗算実験結果

次に、ピコ秒領域における信号相関実験を行なった。図４．６は、2 GHz の正弦波と繰り返し　1 GHz, 50 ps 幅のパルス信号を用いて行なった相関実験の結果である。正弦波信号は集中定数形の素子 Mod.1に、パルス信号は進行波形の　Mod.2に印加している。曲線Ａは Mod.1のバイアス点をＶπ／２に設定しており、印加信号にほぼ対応する出力変化を得ている。曲線Ｂではバイアス点を０に設定し、印加信号の２倍の周波数で光出力が変化するようすを示している。

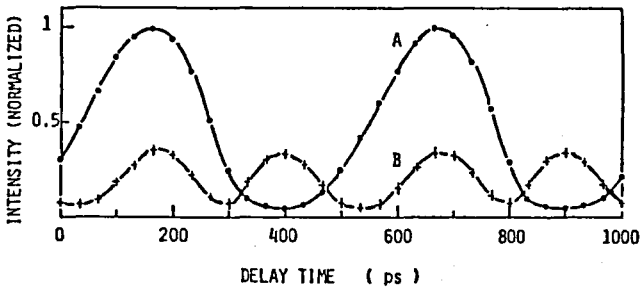


図４．６　サンプリング実験結果

基本測定の結果では、消光比は２つの素子それぞれ18および 19 dBであり、消光比を決定する要因が高次モードによるものならば、4.2.1 で示したように、式（４－４）の係数k_2，k_3 は 0.5前後となる。すなわち個々の素子が十分独立して動作しない。実験では個々の素子が独立して動作していることが示されており、この場合の消光比を決定している要因は分岐比および各素子の平行導波路間の光の結合等によるものと考えられる。

４．３　干渉形光変調素子の並列集積化

導波形光素子の一つの特徴は、光波進行方向（長さ）に比べて、それに直交する方向（幅）の大きさが極端に小さいことである。たとえば、干渉形変調素子では長さ方向がcmオーダであるのに対して、幅方向は 10 μmオー

ダである。単一基板上にこのような素子を集積するには、基板面を有効に使うには、幅方向に多数の素子を並べることが考えられる。このとき、集積度を高めるために間隔を狭くしていくと、並列に並べられた素子間で発生する種々の干渉に留意する必要がある。

4．3．1　光波による素子間の干渉

同一特性の導波路で構成されている２つの光変調素子を並列に配置し、その間隔を狭めていくと、単体素子でも問題となった平行導波路間での光波の結合によって、互いの変調特性に影響を及ぼす。図４．７は２つの変調素子間での影響を調べるためのモデルである。各素子は独立では理想的な動作を行ない、無変調状態では４本の平行導波路は全て等しい特性を持ち、両者間で最も接近している２本の導波路間においてのみ結合が生じると仮定する。　今、変調素子 M_1 は無変調状態であり、素子 M_2 にだけ変調電圧が印加されているとする。結合がないときには、M_1 の出力 P_1 は一定であり、M_2 の出力 P_2 だけが変化する。結合係数をＣとしたとき　M_1 , M_2 の出力 P_1 , P_2 は、次のようになる（付録４参照）。

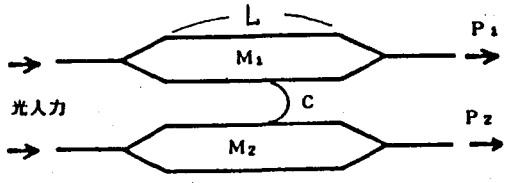


図４．７　並列変調素子間の光波干渉

$$P_1 = \{1+\cos(\delta\cdot L)\cdot\cos(s\cdot L) + [(\delta\cdot L-C\cdot L)/(s\cdot L)]\cos(\delta\cdot L)\cdot\sin(s\cdot L)\}^2/2 \qquad (4-5)$$

$$P_2 = \{\cos(2\cdot\delta\cdot L)+\cos(\delta\cdot L)\cdot\cos(s\cdot L) + [(\delta\cdot L+C\cdot L)/(s\cdot L)]\sin(\delta\cdot L)\cdot\sin(s\cdot L)\}^2/2 \qquad (4-6)$$

ただし、　δ：変調による位相定数差

$s: \sqrt{\delta^2+C^2}$

両者間での結合の大きさC・Lの変化に対するM_2 からM_1 へのクロストークの変化を図4．8に示す。ここで、クロストークはM_2 の変調によって生じるM_1 の出力変化分ΔP_1 と無変調時の　M_1 の最大出力P_1 との比$\Delta P_1 / P_1$ で定義している。クロストークを-10 dB以下とするには導波路間の結合を　$C\cdot L < \pi/23$とする必要がある。-20 dB以下とするには、$C\cdot L < \pi/260$ が要求される。　図4．9はC・LをパラメータとしてM_1 自身の変調出力P_1 の変化の様子を示している。

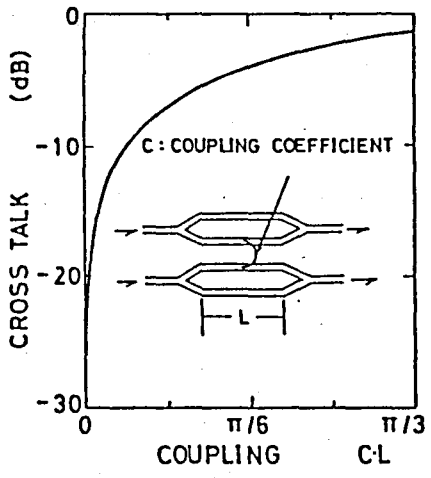


図4．8　近接した素子間のクロストーク

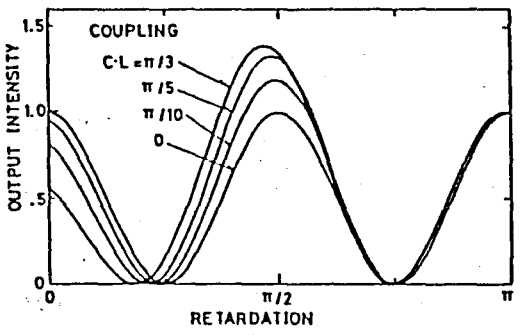


図4．9　並列変調素子間の光の結合による変調特性への影響

一定間隔に置かれた導波路間の光波の結合を減少させるには、いくつかの方法が考えられる。

1．導波路間に、低屈折率の領域を設けて、光波のエバネッセント部分を速やかに減少させる。
2．隣り合う導波路の伝搬定数差をなるべく大きくする。

1の方法の一例としては、第3章で示した溝を形成する方法がそのまま利用できる。2の方法では、導波路の伝搬定数を決定する屈折率差、導波路幅などの種々の要素を導波路毎に変えればよい。なかでも、導波路幅にそれぞれの導波路が単一モードで動作する範囲内でできる限り大きい差をもたせる方法が作製の容易さという点で行ないやすいと考えられる。

4．3．2　電極間での干渉

次に電極間での干渉について、数値解析および実験による検討を行なう。8個の干渉形光変調素子を並列集積化したものを考える。図4．10は実際の素子作製[41,42]に用いた導波路パターンであり、図4．11は作製した電極の部分写真である。計算には、実験に用いた素子との関連から、図4．12に示す電極構造を考えた。

並列に配置された8個の変調素子の中で、中央付近の変調素子M_5の片側の電極に電位Vを与え、他の電極を全て零電位にしている。電極下基板内の領域を横 300、縦 100に分割して、緩和法を用いた数値計算を行なって、領域内各点の電位を求めた。次にこの電位分布をもとに、電極直下の垂直方向の電界成分の大きさを計算した。その結果を図4．12に示す。

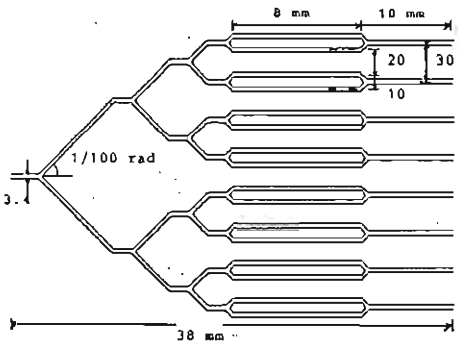
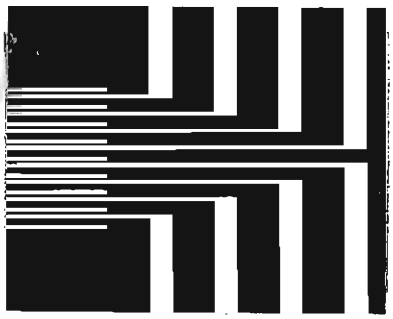


図４．１０　導波路パターン



電極幅　６ μm，一組の電極間隔　７ μm
素子間の電極間隔 11 μm

図４．１１　電極の部分写真

表４．４　変調素子M_5から他素子へのクロストーク

変調素子	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
ｸﾛｽﾄｰｸ（dB）	-34	-29	-23	-12	—	-18	-26	-32

実験で測定した隣接素子間のクロストーク：　-13 ～ -10 （dB）

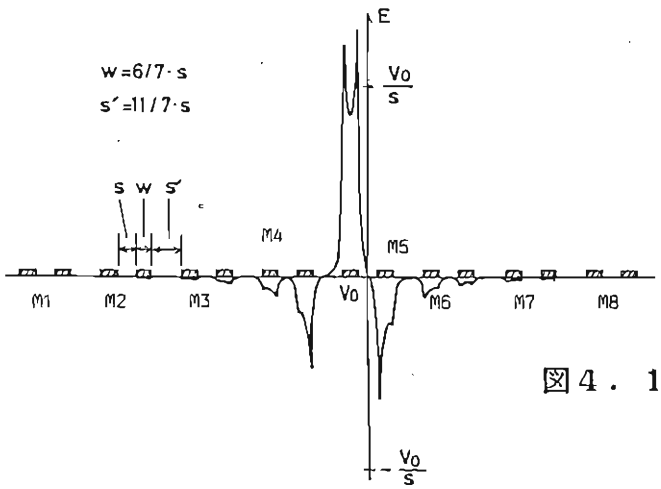


図４．１２　並列変調素子間の
変調電界の干渉

M_5 以外の素子の電極下にも大きい電界成分が生じている。ただし、これらの電界はプッシュプル動作を行なう２本の分枝に同方向の成分が加わっている。したがって、これらの電界による影響の大部分は相殺され、実際には両分枝にかかる電界の差がM_5 を変調した場合の他素子へのクロストークとして関与する。表４．４に計算で求めた各変調素子に生じるクロストークの大きさ、と同時に実験的に調べた結果をを示している。実験では、隣接する素子間でのクロストークは -13～-10 dB、１つ以上離れた素子に対するものは-20 dB以下であり、ほぼ計算値に近いものであった。試作した素子は、付録１に示す作製法を用いて、膜厚 30 nmの Ti パターンを熱拡散して作製した導波路上に、厚さ0.1 μmの SiO_2 バッファ層を介して、厚さ0.5 μmの Al 電極を形成したものを用いた。

４．４　結言

以上、干渉形光変調素子の集積化に関して、縦続接続と並列配置に分けて、それぞれの場合に生じる諸問題を考察した。その結果を以下にまとめる。

１）　縦続接続において、それぞれの素子が独立した動作を行なうには、接続部の導波路には高次モードを十分に遮断する特性が要求される。例えば、両素子の干渉によって出力される光変化量を本来の出力に対して -10 dB以下にするには接続導波路通過後の高次モードの割合が-30 dB以下に抑えられている必要がある。

２）　上記の点を考慮して $LiNbO_3$ 基板上に２つの素子を集積した光信号

相関器を試作し、2 GHz の正弦波信号と約 50 psのパルス信号を用いた相関実験を行ない高速な光信号相関器の動作を確認した。

3） 素子の並列集積化では、素子間の光の結合が問題となり、クロストークを-10 dB以下とするには導波路間の結合を $C \cdot L < \pi / 23$とする必要がある。-20 dB以下とするには $C \cdot L < \pi / 260$ が要求される。

4） また、複数の電極が平行して並ぶため電極間での干渉が問題となる。電極幅6 μm、電極間隔7 μmの各素子が素子間の電極間隔 11 μmで並列集積化されていると、隣接素子間の光出力のクロストークは -10～-18 dB になることを計算および実験により確認した。このとき、一つ離れた素子間では-20 dB以下に減少していた。

第５章　光変調素子の集積化による高速１×４光スイッチとその応用

５．１　序言

本章では、前章までに示した変調素子単体の設計および集積化における問題点を踏まえて、まず、単一基板上に３個の干渉形光強度変調素子を集積化した１入力４出力の光スイッチの構成法を示す。次に、その一つの応用として正弦波変調信号で動作する光タイムデマルチプレクサを提案する。さらに、試作および動作実験によりその有効性を確認した結果について述べる。

これまでに複数の導波形光変調素子を集積化して構成された多端子の光スイッチがいくつか報告されている。いずれも方向性結合器形 [23] あるいは光分岐スイッチ [43,44]を用いたものである。従来の干渉形光変調素子は一般に光分岐回路に対称Ｙ分岐を用いているために、多端子光回路を構成できなかった。ここでは干渉形光変調素子の構成要素として非対称Ｘ分岐を用いて多端子光回路を構成している。

多端子の光スイッチの応用としては、任意の端子をランダムアクセスする光交換器あるいは光時分割多重を行なうためのマルチプレクサ／デマルチプレクサ等が考えられる。これまでに方向性結合器形の光スイッチを用いて各素子をパルス信号で変調することによって、32 Mb/s の光信号分割の実験が行なわれている[23]。パルス変調を行なうには、広い変調帯域幅を持つ素子を必要とする。筆者は正弦波変調を用いることにより狭帯域な素子で高速な光ゲートを得る方法に着目し、新たに単一正弦波駆動で４チャンネルの光ゲートを実現する方式を提案している[29-32] 。

本章では、はじめに基本素子である非対称Ｘ分岐を用いた干渉形光変調

素子の動作説明を行ない、それを集積化した１×４光スイッチの構成法について述べる。次に、正弦波駆動による光サンプリングゲートについて動作説明を行なったのち、単一正弦波駆動による光タイムデマルチプレクサの構成法について述べている。最後に $LiNbO_3$ 基板を用いて光回路を試作し、１×４光スイッチおよび光タイムデマルチプレクサとしての有効性を確認した基礎実験の結果について述べている。

５．２　集積化１×４光スイッチ

５．２．１　非対称Ｘ分岐を用いた相補出力付干渉形光変調素子

図５．１に相補出力付干渉形光変調素子の構成を示す。前章まで主に扱ってきた対称導波路Ｙ分岐を用いた干渉形光変調素子の一方のＹ分岐を非対称Ｘ分岐で置き換えたものである。この非対称Ｘ分岐では対称側の２本の導波路に同位相で入射した光波は非対称側の幅の広い導波路から出力され、逆位相の場合は狭い方から出力される。幅の広い導波路の出力は今までの対称Ｙ分岐出力に対応し、狭い方はＹ分岐では放射されていた光波を出力することになる。したがって、両導波路からは互いに相補的な光出力を得ることができる。図５．２に変調電圧に対する光出力強度変化の特性と正弦波変調を行なった場合の変調出力波形の例を示す。

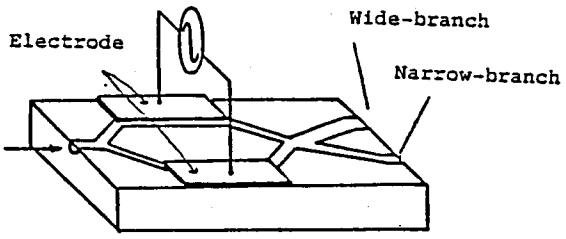


図５．１　相補出力付干渉形光変調素子

相補的な出力を得るには、3-dB方向性結合器を用いることができるが

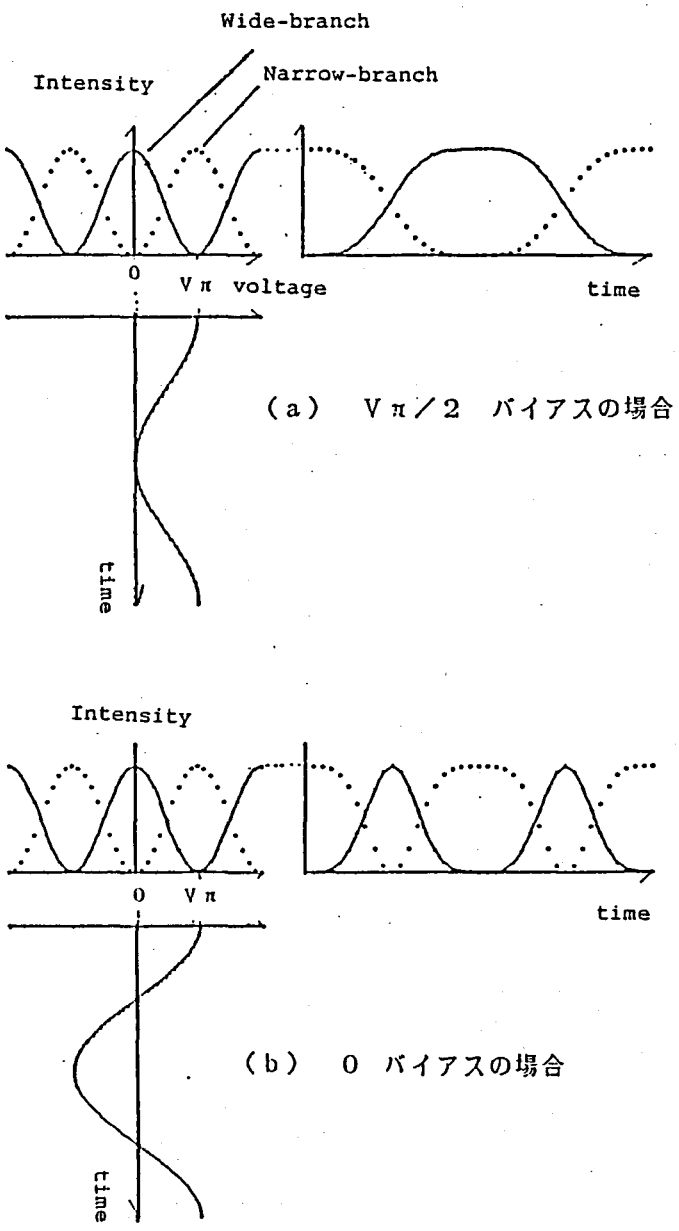


図５．２　相補出力付干渉形光変調素子の変調特性

２章で示したように、高い作製精度を要し、温度安定性に問題がある。それに対して、非対称Ｘ分岐は、その動作を実現するには、対称および非対称側それぞれの対称および非対称性の条件［35］を満足すればよく、拡散導波路の場合適切な導波路作製マスクを用いることによって比較的容易に作製できる。温度変化に対しても、Ｙ分岐同様に安定している。

５．２．２　１×４光スイッチの構成

図５．３に１×４光スイッチの構成を示す。単一基板上に３つの干渉形光変調素子を集積している。それぞれの変調素子は前項で説明したプッシュプル動作の相補出力付き干渉形変調素子であり、１入力２出力の光スイッチとして動作する。

初段の素子の２本の出力導波路はそれぞれ次段の素子の入力導波路に接続されている。適当な制御電圧をそれぞれの素子に印加して各素子のスイッチング状態を定めることにより、初段に入力した光は２段目のいずれかの素子の入力となり、最終的には２段目の素子のいずれかの出力導波路か

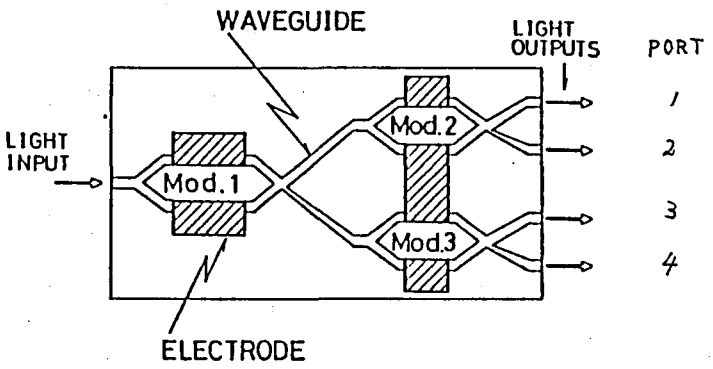


図５．３　１×４光スイッチの構成

ら出力される。各素子は電気光学効果を用いた相反的な動作を行なうので図５．３の右側の４本の出力導波路から入力した光を適当な電圧により、左側の入力導波路から選択して出力することもできる。

また、２段目の各出力導波路にさらに４個の素子を接続して，１×８光スイッチを構成できる。同様に順次素子を増すことにより、Ｎ段構成とすれば1×2^{N}光スイッチを構成することも可能である。

５．３　単一正弦波駆動光タイムデマルチプレクサ

５．３．１　正弦波駆動による光サンプリングゲート

４．２節で示したように変調素子を縦続接続することにより、全体的な特性は各素子の透過特性の積として得られる。そこで、Ｎ個の干渉形光変調素子の縦続接続を考える。ｊ番目（$1\leq j\leq N$）の素子に加える電圧を

$$V_j(t)=2^{J-1}V\pi\cdot\sin(2\pi f t) \qquad (5-1)$$

とすると、電圧に対する透過特性は、

$$T_j(V)=\cos^2(\pi\cdot V_j/2V\pi) \qquad (5-2)$$

となる。時間に対する特性は

$$T_j(t)=\cos^2[2^{J-1}\sin(2\pi f t)\cdot\pi/2] \qquad (5-3)$$

となる。したがって、縦続接続したときの全体の特性は、

$$T(t) = \prod_{j=1}^{N} \cos^2 [2^{j-1} \sin(2\pi f t) \cdot \pi / 2] \qquad (5-4)$$

変調電圧を

$$Vj(t) = j \cdot V\pi \cdot \sin(2\pi f t) \qquad (5-5)$$

とすることも可能であり、そのときの全体の透過特性は、

$$T(t) = \prod_{j=1}^{N} \cos^2 [j \cdot \sin(2\pi f t) \cdot \pi / 2] \qquad (5-6)$$

となる。N＝１，２，３　それぞれの時間に対する透過特性を図５．４に示す。これから明らかなように、縦続接続の段数を増すことにより、透過時間幅は狭まっていき、正弦波変調によって短い光サンプリングゲートが得られる。

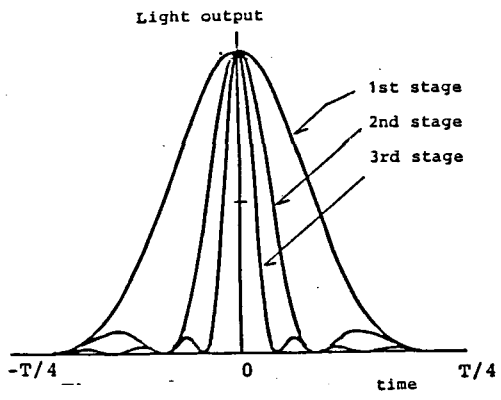


図５．４　変調素子の縦続接続による光サンプリング

ここで、１段目の素子の半波長電圧Ｖπ１に対して、各素子の半波長電圧を　Ｖπｊ＝Ｖπ１／2^{j-1}　あるいは、Ｖπｊ＝Ｖπ１／ｊとすれば、

$$Vj = V\pi_1 \cdot \sin(2\pi f t) \qquad (5-7)$$

となり、すべての素子を同一の電圧で駆動できる。すなわち単一の正弦波駆動による光サンプリングが実現できる。

５．３．２　光タイムデマルチプレクサの構成法

前節で述べた正弦波変調を利用した光サンプリング技術を多端子光スイッチに応用することにより、多チャンネルの光サンプリング回路が実現できる。図５．５に正弦波駆動１×４光タイムデマルチプレクサの構成および動作説明図を示す。全体の系は先に述べた集積化１×４光スイッチ、正

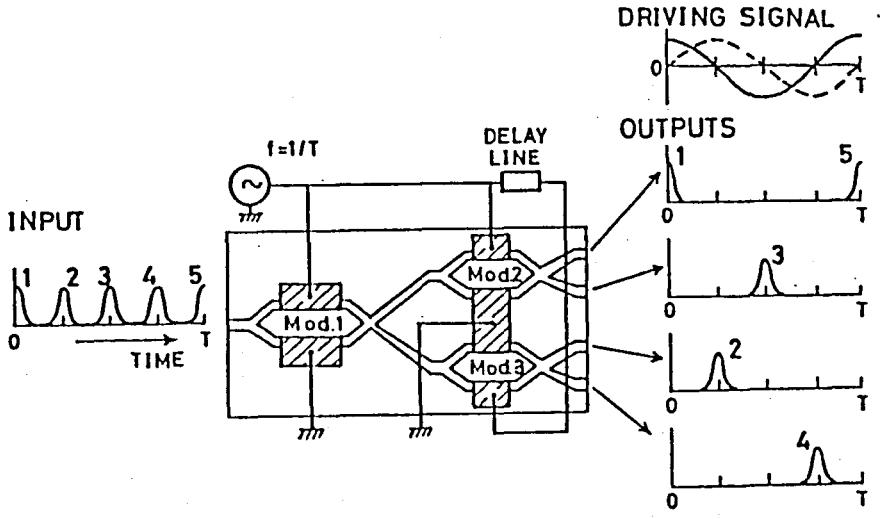


図５．５　光タイムデマルチプレクサの構成

弦波発信器および固定移相器から構成されている。光スイッチを構成する３個の変調素子は全て同一周波数ｆ（周期：Ｔ＝1/ｆ）で変調される。このとき最小パルス間隔がＴ/4の光パルス列からなる入力信号は、４個の出力端ではそれぞれタイミングが異なる1/Ｔ周期毎にサンプリングされて出力される。

5.2.1で説明したように、初段の素子Mod.1 は、変調電圧が加わっていないとき一方の出力分枝のみ完全透過状態となるいわゆる零光学バイアス状態にあるとする。このとき変調電圧　Ｖπを加えると他方の分枝が完全透過となる。変調電圧の一周期の間にそれぞれの分枝は２回完全透過状態となる。すなわち入力した光信号は変調波の周期の1/2 の周期で各分枝から交互に出力される。それぞれの出力は２段目の素子 Mod.2,3の入力となる。

これら２段目の素子は変調電圧０では入力した光が２つの出力分枝から等しく出力されるいわゆるπ/4光学バイアス状態にある。このとき 5.2.1 の図５．２に示されるように変調電圧　Ｖπ／2　で一方の分枝が、
－Ｖπ／2 では他方の分枝が完全透過状態となり、変調電圧と同周期でそれぞれの分枝から光が出力される。

ここで初段の素子は最大値Ｖπ、次段の素子はＶπ／2 の正弦波で変調されるが、次段の素子の半波長電圧を次段の 1/2となるように設計すれば全素子を同じ電圧で変調できる。

４つの出力端（Port 1～4 ）のうち、前段と次段の素子の完全透過の時間が一致する出力端は完全透過となり、他の３つの出力端は遮断状態となる。これらの関係を図５．６に出力端１あるいは３に出力が出る場合の系のタイミングチャートとして示す。同図(b) では駆動信号が２種類示されているが、破線で示す信号は素子Mod.3 を変調するためのものである。

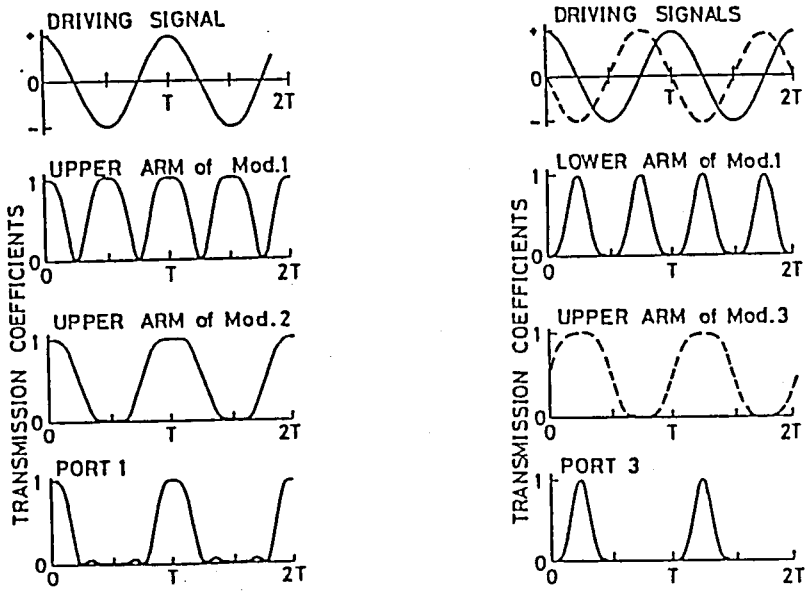


図５．６　駆動信号と各分枝の透過特性とのタイミングチャート

Mod.1 でMod.3 に振り分けられた光信号と同期させるためにこのように π/4位相がずれた変調信号を必要とする。これは、図５．５に示された固定移相器で容易に得られる。したがって３個の変調素子は１つの電源で変調されることになる。

５．４　設計および試作

１×４光スイッチの設計にあたつては、第３，４章それぞれに示した変調素子単体の設計および集積化における問題点を考慮している。また、単一正弦波駆動光タイムデマルチプレクサへの応用を考えて、以下の点に留意した。

導波路パターン設計

1) 各素子の消光比を20 dB 以上とするため、平行導波路間隔を 11 μm 以上とする。

2) ２段目の２つの素子間での干渉を抑えるため素子間隔を各素子の導波路間隔　と同程度以上とする。

3) 光タイムデマルチプレクサへの応用のため初段の素子の半波長電圧を次段の 1/2となるように電極を設ける導波路部分の長さを初段は次段の２倍とする。

電極設計

1) 初段の素子の半波長電圧を次段の 1/2となるように初段の電極長を次段の２倍とする。

2) 変調は集中動作とし、そのときの帯域が 1 GHz以上とることができる電極容量となるように電極幅を定める。

図５．７、図５．８それぞれに、導波路および電極パターンを示す。基本的な導波路幅は3.6 μmであるが、非対称分岐部では、4 μm、3 μm であるため、初段の出力非対称分岐と次段の入力直線導波路を接続する部分にはテーパ部を設けている。Mod.1 では電極幅および間隔はそれぞれ 30 および 11.4 ㎛である。このとき電極容量および負荷抵抗 50 Ω から決まる3-dB帯域幅は約 2 GHzと計算される。Mod.2,3 では約 4 GHzである。

付録１に示す作製法を用いて $LiNbO_3$　z板上に Ti 拡散による光導波路を作製した。端面からの光入出力のために、結晶両端面の光学研磨を行なった後、 SiO_2 バッファ層および Al 電極をフォトリフトオフ法およびフォトエッチング法を用いて作製した。作製条件を表５．１に示す。

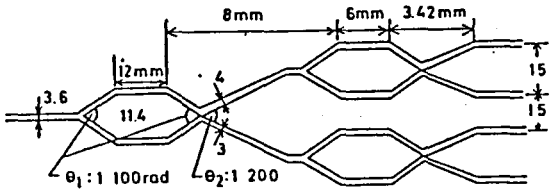


図５．７　試作素子の導波路パターン

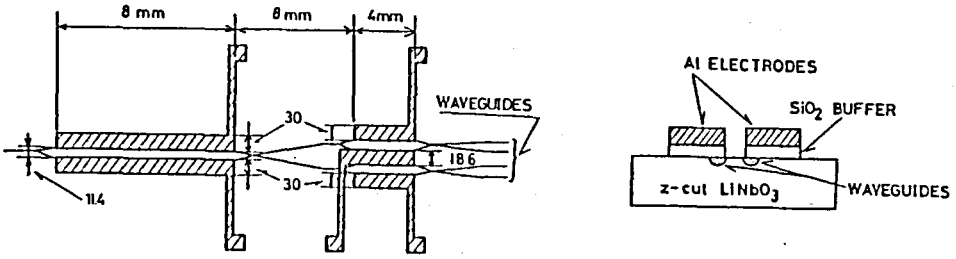


図５．８　試作素子の電極パターン

表５．１　　作製条件

基板		$LiNbO_3$ z 板 （ 5x39x0.5 mm ^{3} ）
光導波路		Ti 拡散
	Ti 膜厚	20 nm
	拡散温度	980 °C
	拡散時間	4.5 h
	拡散雰囲気	酸素
バッファ層		SiO_2 （高周波スパッタ）
	膜厚	150 nm
電極		Al （電子ビーム蒸着）
	膜厚	500 nm

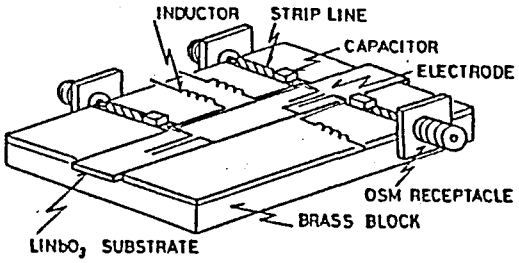


図５．９　１×４光スイッチの構成

次に作製した基板を外部回路との接続のため真鍮ブロック上に固定した。図５．９にその概略図を示す。各変調素子の電極に光学バイアス設定のための直流電圧と変調交流信号を同時に印加するため、ストリップライン基板上にLC回路を用いたバイアスＴを構成している。また各素子の負荷抵抗として 50 Ωのチップ抵抗をストリップライン基板内に埋めこんでいる。

５．５　１×４光スイッチの基本特性測定

試作した素子のスイッチ（半波長）電圧、消光比、クロストーク等の基本特性を評価する実験を行なった。実験には、波長633 nmの He-Neレーザ光を用いて、顕微鏡対物レンズを通して導波路への光入出力を行なった。４本の出力導波路からの出射光をピンホールを用いて選択し、各素子に加わる変調電圧に対する光強度の変化を測定した。測定結果を表５．２に示す。半波長電圧に関しては、設計どおり、Mod.1 は他の素子のほぼ 1/2であった。消光比は最悪の場合 18 dBであり設計の 20 dBに近い値が得られ、またクロストークは最悪の場合-18 dBであった。

図５．１０に出力端の近視野像とそのときに各素子に印加している電圧

とを示す。各素子に適当な電圧を加えることにより、各種スイッチ状態が得られる様子が示されている。

表５．２　半波長（スイッチ）電圧と消光比

変調素子	半波長（スイッチ）電圧（Ｖ）	消光比（ｄＢ）
Ｍｏｄ．１	６．６	＞１８
Ｍｏｄｓ．２，３	１３．３	＞１８

使用光：λ＝６３３　ｎｍ，　ＴＥ－ｍｏｄｅ

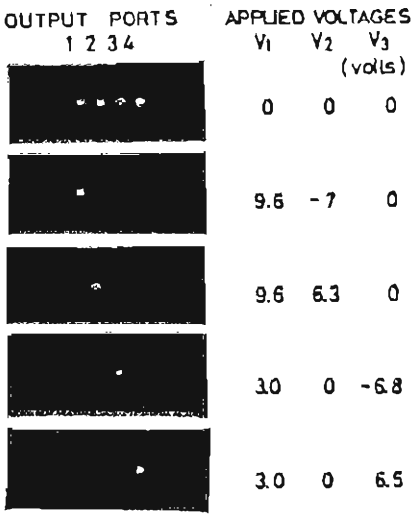


図５．１０　試作素子の
スイッチング特性

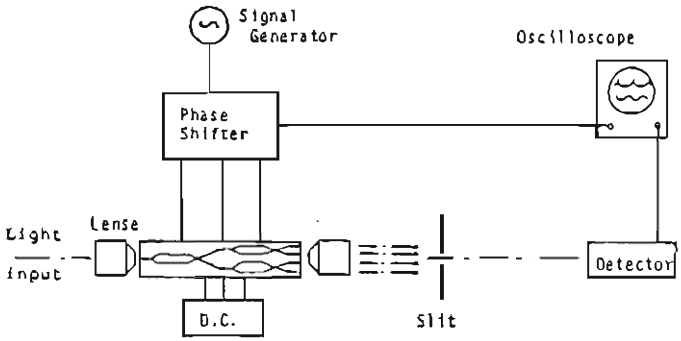


図５．１１　低周波実験の構成

５．６　光タイムデマルチプレクサ実験

５．６．１　低周波動作実験

５．３．２節で述べた４チャンネルの光タイムデマルチプレクサの動作を確認するために、まず低周波変調信号を用いた基礎実験を行なった。実験系を図５．１１に示す。変調信号として位相の異なる２種類の正弦波を得るために、電源には、正弦波発信器および演算増幅器を利用した移相器を用いている。ピンホールを用いて順次選択した出力光を光検出器で検出し、その波形をオシロスコープ上で観測した。　　このとき参照信号として、Mod.1 へ加えている変調電圧を同時に観測している。

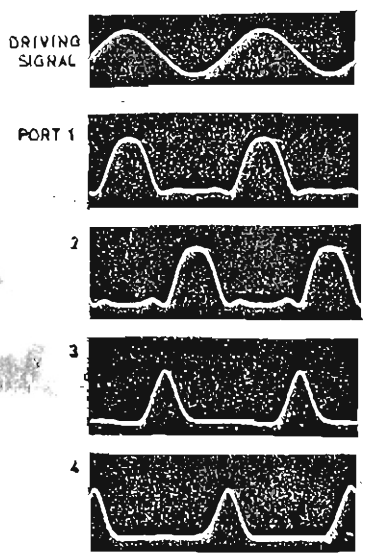


図５．１２　低周波実験結果

図５．１２に観測結果を示す。最上部の写

真がMod.1 への変調電圧である。周波数は10 kHzで，電圧は13 Vp-p である。Mod.2 にも同じ変調信号を加え、Mod.3 には同振幅で位相がπ／4ずれた信号を加えている。残りの写真は各出力端（Port 1～4 ）での光強度変化を示している。入射光に連続光を用いているので、図に示された光強度変化は各出力端での時間に対する光透過特性を示すことになる。この結果は 5.3.2で示した動作とよく一致しており、期待された動作が行なわれていることを示している。

５．６．２　高周波動作実験

次に高周波での動作を確認するために、変調信号周波数 1 GHzで実験を行なった。このとき予想される光出力波形に応答するには 1 GHz以上の高速光検出器を必要とし、また素子の光出力強度が2 μW 程度の微弱光であるため、通常のＡＰＤ等の光検出器では、応答速度、感度の点で問題がある。そこで、付録　に示すストリークカメラを用いた測定[45-47] を行なった。　図５．１３に測定系を示す。1 GHz 正弦波信号を方向性結合器を用いて分割して、光変調用およびストリークカメラ掃引用信号としている。

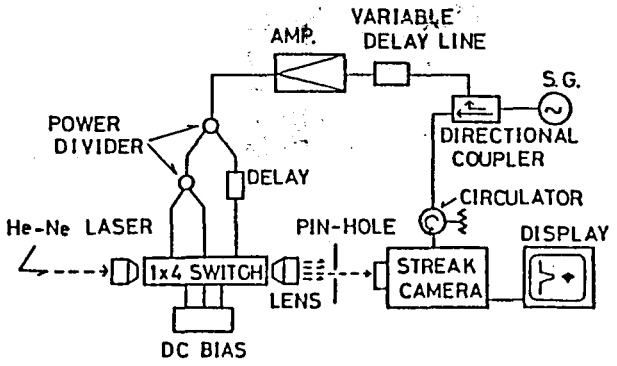
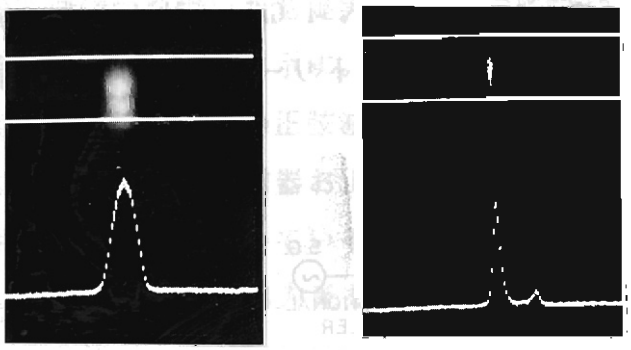


図５．１３　高周波実験の構成

可変移相器を通した後増幅したものを電力分配器および移相器を用いて、３個の素子に加える変調信号としている。変調電力は１素子あたり400 mWである。測定する光出力のピークがストリークカメラ掃引面の中央に位置するように可変移相器を調整する。各出力を測定したときのそれぞれの移相量（遅延時間に対応）から各出力のピーク間の時間関係が得られる。

図５．１４に観測したストリーク像の例を示す。(a) はPort 3から，(b) はPort 1からの出力である。(a) では出力ピークを掃引面中央に位置するように移相器を調整してある。（ｂ）では、ピークが掃引面端（写真で左側）に位置するように調整した例である。得られたストリーク像は正弦波掃引であるため、時間軸が線形でない。そこで、これを線形になるように変換し、さらに測定で得た移相量に対応する時間関係を考慮して各出力の特性を示したものが図５．１５である。

実験では、入力光として連続光を用いているので、図５．１５は各出力端での時間に対する光透過特性を示すことになる。入力光として、光パル



（a）　ＰＯＲＴ　３　　（b）　ＰＯＲＴ　１

図５．１４　観測したストリーク像の例

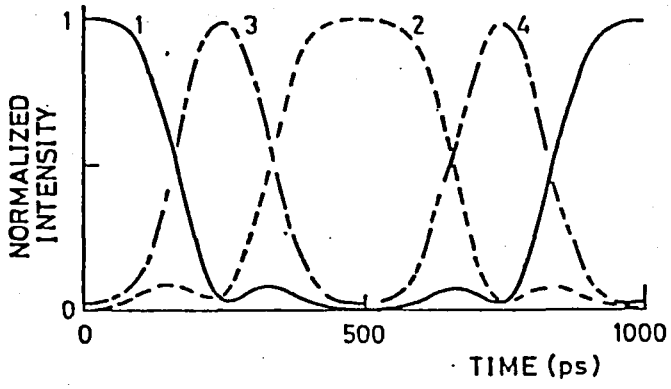


図５．１５　高周波実験結果

ス列を用いた場合には、各出力端の透過時間と一致した光パルスを選択することにより、たとえば多重化された4 Gb/sの光信号をそれぞれ1 Gb/sの４チャンネルの信号に分割することが可能である。

変調を正弦波で行なっているために、本質的には、変調素子は狭帯域なものでよい。したがって、素子の電極構造に工夫を加え共振形とすることによって、さらに高能率・高速な動作が期待できる。

５．７　結言

以上、干渉形光変調素子を集積化して新たな多端子光スイッチを構成し、正弦波駆動による光タイムデマルチプレクサへの応用を提案し、試作・基礎実験によりその有効性を確認した。ここで得られた結果をまとめると、

1） 非対称X分岐を出力側に用いた干渉形光変調素子を３個集積化した１×４光スイッチでは、各素子のスイッチ（半波長）電圧は、 波長633 nm, ＴＥモードにおいて、6 V (Mod.1), 13.3 V （Mod.1,2 ）であり、 18 dB以上の消光比がえられ、またクロストークは-18 dB以下であった。

2） ３個の素子への印加電圧をそれぞれ独立に適当に選ぶことにより、任意のスイッチ状態を選択でき、素子間の干渉が十分に抑えられたものであった。

3） ４チャンネルの光タイムデマルチプレクサでは、提案した構成で計算によるものと一致した特性を実験的に確認できた。得られた光サンプリングゲート幅は駆動正弦波信号の周期の17 %（Port 3,4）および30 %（Port 1,2）であった。

4） 1 GHzの駆動信号を用いた実験では、ゲート幅は、170 ps, 300 psであり、各出力端子は繰り返し1 GHz の光サンプリングゲートとして動作することを確認した。この動作は4 Gb/sの多重化された光パルス列をそれぞれ1 Gb/sの４チャンネルの光信号に分割することに相当する。

変調素子を集積化して多端子の光スイッチを構成するには、各素子が簡単な構成で安定した動作を行なえることが重要である。干渉形の素子では、これまでによく用いられている反転Δβ形の方向性結合器形の素子と比べて簡単な構成で同程度の性能が得られるため、光集積回路の素子として有用であると考える。実際、作製した光回路では、個々の光学バイアス点のばらつきが生じる程度で、これは各素子の一組の電極で変調電圧にバイアス用の直流電圧を重ね合わせることで調整できている。

1 GHz で行なった光タイムデマルチプレクサ実験に相当する動作は各素子にパルス変調を行なって実現することもできる。　それにはゲート幅250 ps程度の電気信号で変調を行なえばよい。しかし、このとき変調素子の帯域幅は 4 GHz以上必要とする。したがって、同程度の帯域幅をもつ素子を用いた場合、正弦波変調による光ゲート技術によって、より高速な動作が行なえることになる。さらに、正弦波変調では電極構造を共振形にできれば、より高能率・高速な動作が期待できる。

第６章　結論

本章では、高速導波形光変調素子とその集積化に関して、筆者がこれまでに行なってきた研究を通じて得られた結果を改めて要約して述べ、今後の課題や問題点を指摘して結論とする。

まず、各章で得られた結果を以下に示す。

第２章では、干渉形光変調素子の動作原理について基礎的な説明をし、Ti 拡散 $LiNbO_3$ 光導波路を用いた干渉形光変調素子の試作・実験の例を示した。試作した素子では、

(1) 同一電極を用いた直交ニコル形（半波長電圧：23 V）に比べて、ＴＭモードにおいて、8.8 V と大幅な半波長電圧の低下がなされ、
(2) 6 mmの電極長で、3-dB変調帯域幅Δｆは、11.5 GHzであり、理論値によく一致した値であった。

第３章では、干渉形光変調素子の高能率化について考察し、平行導波路間の光の結合および光波と変調波の速度非整合を改善する素子構造を提案し、理論的・実験的に検討を行ない、試作・動作実験の結果を示した。

(1) $LiNbO_3$ z板を用いた干渉形素子では高能率化のために電極間隔を狭めると平行導波路間も狭まる。その結果光の結合により消光比が劣化する。光波長 633 nm で単一モードとなる Ti 拡散 $LiNbO_3$ 導波路を用い

た素子で 20 dB以上の消光比を得るには 12 μm程度以上の間隔が必要であり、6 μmでは8 dB以下に低下するが、導波路間に3 μmの深さの溝を形成した場合には、7 dB程度の消光比の向上が見られ、間隔8 μmで 20 dB以上、6 μmでも 15 dB以上の消光比が得られることを実験により確認した。

(2) 電極間隔 10 μm、電極幅 20 μm、の非対称電極を使用した場合には、電極間、基板内に幅6 μm、深さ約4 μmの溝を形成することにより、その変調波に対する実効屈折率は溝がない場合の値の 4.2から 3.8まで低下することを数値計算および実験によって確認した。

(3) 変調実験では、3-dB帯域幅 12 GHz 、半波長電圧 3 V、単位帯域幅当たりの変調電力および変調電圧は、それぞれ、$P/\Delta f = 4.2$ mW/GHz, $V/\Delta f = 0.25$ V/GHzという広帯域・高能率な結果を得た。

第４章では、干渉形光変調素子の集積化に関して、縦続接続と並列配置の場合について、それぞれ集積化に伴って生じる諸問題を考察した。

(1) 縦続接続において、それぞれの素子が独立した動作を行なうには、接続部の導波路には高次モードを十分に遮断する特性が要求される。例えば、両素子の干渉によって出力される光変化量を本来の出力に対して -10 dB以下にするには接続導波路通過後の高次モードの割合が-30 dB以下に抑えられている必要がある。

(2) 上記の点を考慮して $LiNbO_3$ 基板上に２つの素子を集積した光信号相関器を試作し、2 GHz の正弦波信号と約 50 psのパルス信号を用いた相関実験を行ない高速な光信号相関器の動作を確認した。

(3) 素子の並列集積化では、素子間の光の結合が問題となり、クロストークを -10 dB 以下とするには導波路間の結合係数と相互作用長の積を C・L＜π／23とする必要がある。 -20 dB 以下とするには C・L＜π／260 が要求される。

(4) また、複数の電極が平行して並ぶため電極間での干渉が問題となる。電極幅6 μm、電極間隔7 μmの各素子が素子間の電極間隔 11 μmで並列集積化されていると、隣接素子間の光出力のクロストークは -10～-18 dB になることを計算および実験により確認した。このとき、一つ離れた素子間では-20 dB以下に減少していた。

第５章では、干渉形光変調素子を集積化して新たな多端子光スイッチを構成し、正弦波駆動による光タイムデマルチプレクサへの応用を提案し、実験的にその動作を確認した。

(1) 非対称Ｘ分岐を出力側に用いた干渉形光変調素子を３個集積化した１×４光スイッチでは、各素子のスイッチ（半波長）電圧は、波長 633 nm TE モードにおいて、6 V (Mod.1) 、13.3 V (Mod.1,2) であり、18 dB以上の消光比が得られ、またクロストークは-18 dB以下であった。

(2) ３個の素子への印加電圧をそれぞれ独立に適当に選ぶことにより、任意のスイッチ状態を選択でき、集積化に伴う素子間の干渉が十分に抑えられたものであった。

(3) ４チャンネルの光タイムデマルチプレクサでは、提案した構成で計算によるものと一致した特性を実験的に確認できた。得られた光サンプリ

ングゲート幅は駆動正弦波信号の周期の 17 % (Port 3,4) および 30 % (Port 1,2) であった。

(4) 1GHz の駆動信号を用いた実験では、ゲート幅は、170 ps, 300 ps であり、各出力端子は繰り返し1 GHz の光サンプリングゲートとして動作することを実証した。この動作は4 Gb/sの多重化された光パルス列をそれぞれ1 Gb/sの４チャンネルの光信号に分割することに相当する。

次に、問題点および今後の課題を示す。

第３章に示した進行波動作の変調素子では、 帯域幅は理想的には、13.5 GHz程度と見積もられるのに対し、電極のインピーダンス不整合（電源及び負荷の 50 Ωに対し、変調電極は 40 Ω）により少し値が小さくなっている。たとえ、速度非整合がある程度改善されても、線路と外部回路とのインピーダンス整合および線路の損失を十分考慮しないと広帯域化にあまり効果が得られないことを示している。今後、この点を改善することにより、さらに高能率な素子が得られると考えられる。

1 GHzで行なった光タイムデマルチプレクサ実験に相当する動作は各素子にパルス変調を行なって実現することもできる。それにはゲート幅250 ps 程度の電気信号で変調を行なえばよい。しかし、このときの変調素子の帯域幅は 4 GHz以上必要とする。したがって、同程度の帯域幅をもつ素子を用いた場合、正弦波変調による光ゲート技術によって、より高速な動作が行なえることになる。このような正弦波変調による動作では、その特性を十分に生かすために、今後、電極構造を共振形にする工夫を加えることによって、より高能率・高速な動作の実現が期待できる。

謝辞

本研究を行なうに際し、終始懇切な指導と暖かい助言を賜わった末田正教授に深く感謝の意を表します。

また、本論文の作成に際して、暖かい指導ならびに励ましを頂いた山本錠彦教授に深く感謝の意を表します。

筆者が大阪大学基礎工学部および大学院基礎工学研究科に在学中、日頃からお世話になり、暖かい御指導を賜わった藤澤和男教授、難波進教授、浜川圭弘教授に深く感謝します。

本研究の全般を通じて、終始一貫して直接御指導頂いた井筒雅之助教授に深く感謝します。

本研究に関し、種々有益な助言と不断の励ましを頂いた末田研究室の小林哲郎助教授、松島朋史氏、森本剛裕氏に深く感謝します。

また、本論文作成中、暖かい励ましを頂いた山本研究室の西村貞彦氏、岡村康行氏、北谷和弘氏に深く感謝します。

本研究を行なうに際し、装置を使用させて頂いた大阪大学付属極限微細ビーム加工実験施設の諸氏に深く感謝します。

最後に、本論文第３章の素子作製に協力頂いた西田正二氏、第４章の実験ならびに計算に協力頂いた太田雅人君に深く感謝します。

参考文献

(1) S.E.Miller:Bell Syst.Tech.J.,48,2059(1969).

(2) D.B.Anderson:IEEE Spectrum,12,22(1978).

(3) D.Mergerian,E.C.Malarkey:3rd IOOC,WH2,San Francisco (1981).

(4) R.C.Alferness:IEEE Trans. Microwave Theory Tech.,30,1121(1982).

(5) M.Izutsu,T.Itoh,T.Sueta:IEEE J.Quantum Electron.,16,287(1977).

(6) M.Izutsu, H.Haga,T.Sueta:Trans.IECE Japan,E-63,817(1980).

(7) K.Kubota,J.Noda,O.Mikami:IEEE J.Quantum Electron.,16,287(1977).

(8) R.C.Alferness,N.P.Economou,L.L.Buhl:Appl.Phys.Lett.,38,214(1981)

(9) R.C.Alferness,C.H.Joyner,L.L.Buhl,S.K.Korotky:IEEE J.Quantum Electron.,19, 1339(1983).

(10) O.Mikami, J.Noda:Appl.Phys.Lett.,33,856(1978).

(11) H.Kogelnik,R.V.Schmidt:IEEE J.Quantum Electron.,28,503(1976).

(12) P.S.Cross,R.A.Baumgartne,B.H.Kolner:Appl.Phys.Lett.,44,486(1982).

(13) L.A.Molter-Orr,H.A.Haus,F.J.Leonberger:IEEE J.Quantum Electron.,19,1877 (1983).

(14) E.A.J.Marcatili:Appl.Phys.Lett.,19,1468(1980).

(15) P.L.Liu:J.Opt.Commun.,2,2(1981).

(16) T.Sueta, M.Izutsu:J.Opt.Commun.,3,52(1982).

(17) R.C.Alferness,S.K.Korotky,E.A.J.Marcatili:Appl.Phys.Lett.,44, 486(1984).

(18) H.F.Taylor,M.J.Taylor,P.W.Bauer:IEEE J.Quantum Electron.,15,210(1979).

(19) F.J.Leonberger,C.E.Woodward,R.A.Becker:Appl.Phys.Lett.,32,565(1982).

(20) R.V.Schmidt,L.L.Buhl:Electron.Lett.,12,575(1976).

(21) M.Izutsu,S.Shikama,T.Sueta:IEEE J.Quantum Electron.,17,2225(1980).

(22) H.F.Talor:Appl.Opt.,17,1493(1978).

(23) M.Kondo,Y.Ohta,M.Fujiwara,M.Sakaguchi:IEEE J.Quantum Electron.,18, 1759(1982).

(24) 井筒、芳賀、末田：電子通信学会技術研究報告，OQE80-37(1980).

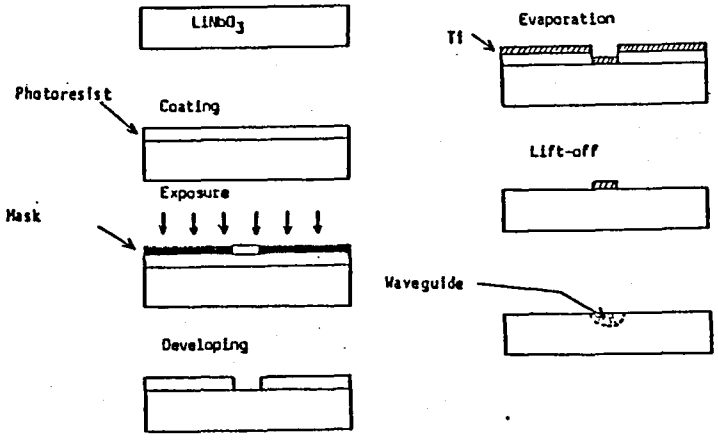
(25) 芳賀、末田：昭和５９年度電子通信学会総合全国大会，1097(1984).
(26) 芳賀、井筒、末田：輻射科学研究会，RS84-15,(1984).
(27) 芳賀、井筒、末田：電子通信学会技術研究報告，OQE82-69(1982).
(28) M.Izutsu, H.Haga,T.Sueta:IEEE J.Lightwave Tech.,1,285(1983).
(29) 芳賀、井筒、末田：昭和57年度電子通信学会光・電波部門大会，309(1982).
(30) 芳賀、井筒、末田：輻射科学研究会，RS82-20(1983).
(31) H.Haga, M.Izutsu,T.Suet:4th IOOC, 30B2-3,Tokyo(1983)
(32) H.Haga,M.Izutsu,T.Sueta:to be published in IEEE J.Lightwave Tech.,Feb. (1985).
(33) M.Minakata:Appl.Phys.Lett.,35,40(1979).
(34) M.Izutsu,Y.Nakai,T.Sueta:Opt.Lett.,7,136(1982).
(35) W.K.Burns,A.F.Milton,A.B.Lee,E.J.West:Appl.Opt.,15,1053(1976).
(36) M.Izutsu,A.Enokihara,T.Sueta:Opt.Lett.,7,549(1982).
(37) Y.M.Poplavko,V.V.Meriakri,V.N.Aleshechkin,V.G.Tsykalov,E.F.Ushatkin, A.S.Knyazev:Sov.Phys.Solid State,15,991(1973).
(38) 例えば，D.Marcuse:"Theory of dielectric optical waveguides"
(39) S.Yamada,M.Minakata:Japanese J.Appl.Phys.,20,733(1981).
(40) H.A.Haus,S.T.Kirsch,K.Mathyssek,F.J.Leonberger:IEEE J.Quantum Electron., 16,870(1980).
(41)芳賀、井筒、末田：昭和57年度電子通信学会総合全国大会，889(1982).
(42)太田、芳賀、井筒、末田：昭和59年度電子通信学会光・電波部門大会,380(1984).
(43) R.A.Soref,D.H.McMahon:Electon.Lett.,14,283(1978).
(44) K.Mitsunaga,K.Murakami,M.Masuda,J.Koyama:Appl.Opt.,19,22(1980).
(45)芳賀、井筒、末田：昭和５４年秋季第４０回応用物理学会，1a-R-6(1979).
(46) M.Izutsu, H.Haga,T.Sueta : Electron.Lett.,16,531,(1980).
(47) M.Izutsu,T,Sueta:IEEE J.Quantum Electron.,19,668(1983).

付録１　Ｔｉ拡散ＬｉＮｂＯ$_3$光導波路の作製法

第２章から第５章において試作した素子の導波路作製法をしめす。

図Ａ１．１に導波路作製過程をしめす。 $LiNbO_3$ 結晶の表面に塗布されたフォトレジストに、密着光露光法をもちいて導波路の反転パターンを形成する。その上に金属 Ti 膜の真空蒸着を行なう。その後、溶剤をもちいてレジストを除去する。このときレジスト上の Ti 膜はレジストとともに基板からはく離し、基板上には Ti による導波路パターンが得られる。この試料を 1000 °C前後の温度で熱拡散を行なう。 Ti が拡散した部分は基板と比べて高屈折率となり、光導波路が形成される。

光露光用マスクには、電子ビーム露光法（大阪大学付属極限微細ビーム加工実験施設を利用）によって形成したクロム乾板を用いている。フォトレジストは AZ-1350（Shipley 社製）を用いて、約 500 nm の厚さにスピンコーティングしている。　レジスト除去にはアセトン中で超音波洗浄を



図Ａ１．１　Ｔｉ拡散ＬｉＮｂＯ$_3$光導波路の作製法

20～60秒行なう。その後、白金板で作製したボートにのせた試料を石英管中に入れ、拡散用電気炉に挿入する。温度上昇は、常温から設定温度まで約90分で行なっている。その後、一定温度で数時間たもった後、電気炉の電源を切り自然冷却する。本文中に示した作製条件の中で拡散時間はこの一定温度（拡散温度）で保っている時間を意味する。拡散雰囲気は第2章に示した素子では乾燥アルゴンを用いているがそれ以降のものは光損傷を減少させるため水中を通した酸素（Wet Oxygen）を用いている。いずれの場合も空気雰囲気で冷却した。

Ti 拡散 $LiNbO_3$ 光導波路においてはLi_2O 外拡散と光損傷が問題となる。Li_2O 外拡散により結晶表面全体で異常屈折率が増加する、その結果 Ti 拡散部分の光とじ込め効果が弱くなり、極端な場合にはスラブ導波路が形成される。この現象は異常屈折率のみにおこり、$LiNbO_3$ z板ではTMモード、y板ではTEモードに影響がでる。いずれも電気光学定数の値が最も大きい γ_{33} を利用するモードであるため、電気光学効果を利用するデバイス作製には望ましくない問題である。本研究における各素子の試作の過程においてもいくつかの改善策を試みたが決定的な方法は得ていない。光損傷は導波路に入射する光パワーを増加させた場合、光誘起屈折率変化により導波層の屈折率が減少し導波層周辺の屈折率が上昇する結果、光とじ込め効果が弱くなる現象である。これは特に可視光領域において顕著であり、本研究で行なった実験で用いた633 nm光源でも問題となり、実験では出力光強度が2 μW程度で行なった。

付録２　高周波における強度変調度の測定

変調素子の特性を測定するには、実時間の変調波形を観測することが望ましいが、本研究で対象としている GHz以上の高速光波形の場合、光検出器の応答速度、感度などが十分でないため、困難である。そのような高速光変調素子の特性を評価するために、以下に示すような応答速度の遅い光検出器を使用して変調度を測定する方法が用いられる。

１．変調された光のスペクトル分布を測定して、搬送波と側波帯成分との関係から変調度を求める。

２．変調信号を光検出器が応答する低周波でさらに変調し、その出力波形を観測して変調度を求める。

一般に干渉形光変調素子において強度変調された光は、同時に位相変調成分を含んでいる。通常のスペクトル観測では、スペクトル各成分の強度のみを測定するため、正確な強度変調度測定は困難となる。したがって、本研究では２の方法を用いて、変調度測定を行なっている。とくにここでは、光学バイアスがわずかにずれている場合でも可能であるように考慮した方法を説明する。

図Ａ２．１は、変調波を低周波方形波で断続した場合の出力光強度の時間変化を示している。光検出器の応答が変調波の周波数に比べて十分遅い場合、検出する光強度は時間平均値となり、変調波が加えられているとき、切られているとき、それぞれ、Ｉ，Ｉ－ΔＩ　となる。変調波による位相変化は、バイアス量　$\Delta\phi_0$を考慮して、

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 + \Delta\phi_m \cos(\omega_m t)$$

となり、出力光強度の瞬時値　Ｉinstは、

$$I_{inst} = I_0 \sin^2 [(\Delta\phi_0 + \Delta\phi_m \cos(\omega_m t))/2]$$

したがって、

$$I = (1/2\pi) \cdot \int_{-\pi}^{\pi} I_{inst}(d\omega_m t)$$

$$= (I_0/2)(1 - \cos\Delta\phi_0 \cdot J_0(\Delta\phi_m))$$

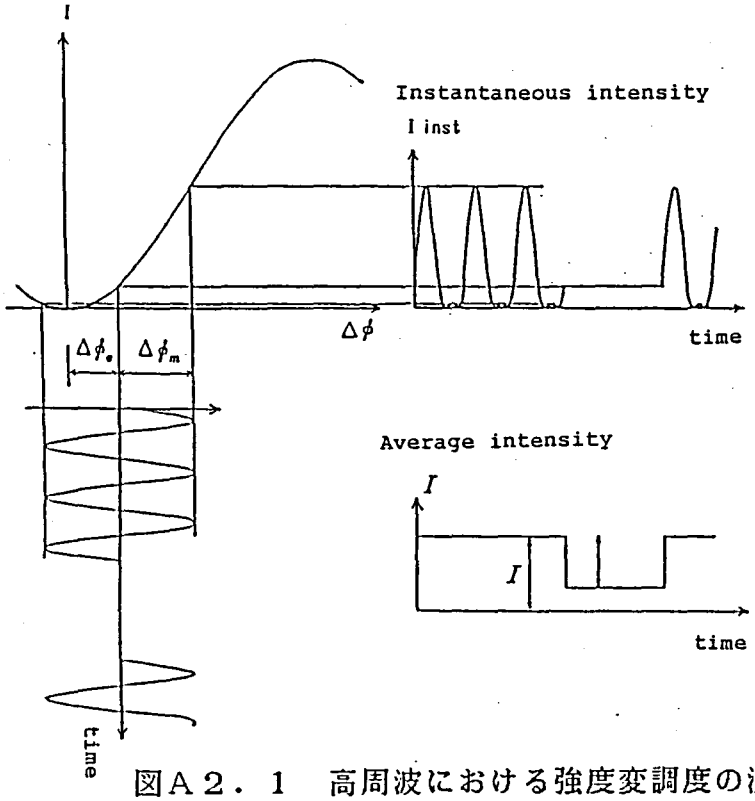
一方、

$$I - \Delta I = (I_0/2)(1 - \cos\Delta\phi_0)$$

したがって、

$$J_0(\Delta\phi_m) = 1 - (2\Delta I/I_0)/\cos\Delta\phi_0$$

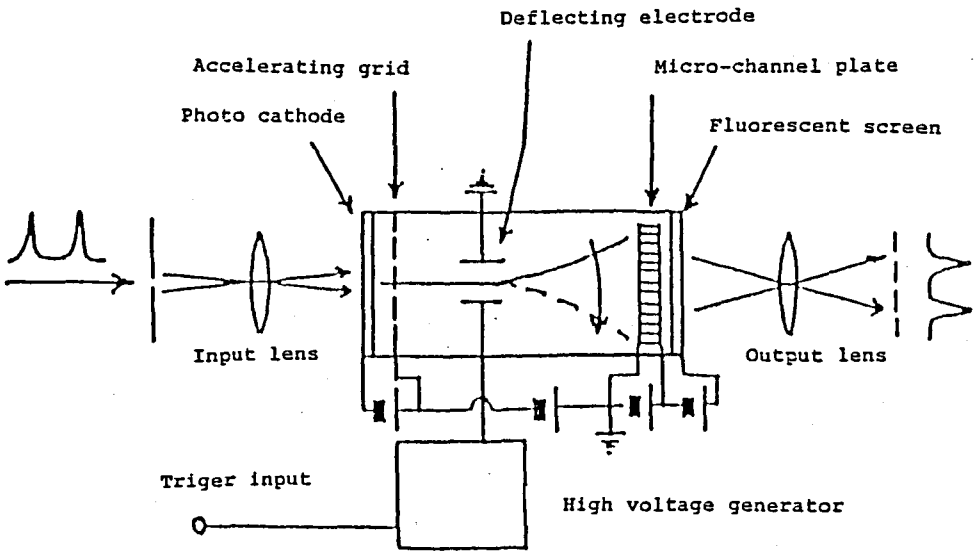
よって、I_0 および ΔI を測定すると、$\Delta\phi_m$ がわかる。



図Ａ２．１　高周波における強度変調度の測定法

付録３　高速光強度変調波形の観測

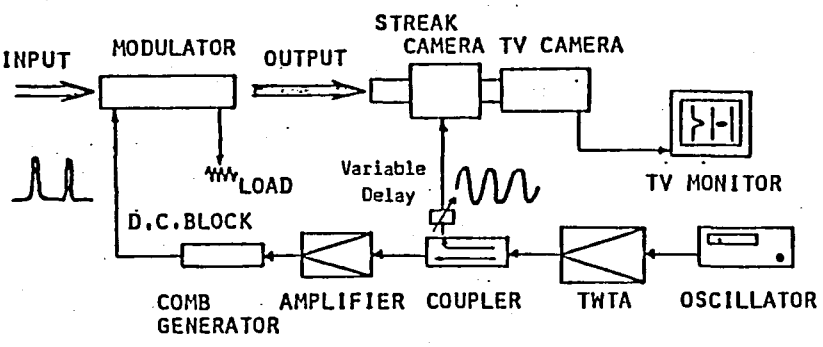
強度変調された光の時間波形観測には、光電子増倍管、 PINフォトダイオード、 APD等の使用が一般的である。これらの光検出器では、10 GHz以上の周波数あるいは 100 ps 以下のパルスによる変調波形観測には応答速度、感度等の点で不十分である。高速光波形観測法としては、通常、カーシャッタ、二光子蛍光法、SHG 相関法等が用いられる。しかし、これらの方法では、比較的大きな光電力を必要とし、本研究で対象としている光変調素子の出力光のような微弱光に対しては適当でない。今までに報告されている変調素子による高速変調波形の観測としては、モードロックレーザの繰り返しパルスを用いた相関法によって変調素子のパルス応答を測定したものがあるが、本研究ではイメージチューブ ストリークカメラ を用いた観測法を試みている。



図Ａ３．１　イメージストリークカメラの構成

図Ａ３．１はイメージストリークカメラの構成である。スリットを透過した強度変調光を光電管面上に受け、発生する光電子を加速し、高速偏向することによって蛍光面上に入射光強度に比例した濃淡の時間分解像を得るものである。時間分解能はスリット幅と掃引速度で決まる。偏向方式としては、光信号に同期したランプ電圧あるいは正弦電圧を発生させて偏向角を直線的あるいは正弦的に変化させる方式がある。いずれの場合も観測される光信号と掃引信号との同期が重要である。直線偏向方式では偏向時間外に入射する光はすべて背景雑音となるため、この光を遮断する必要がある。正弦偏向方式の場合は、同一掃引領域を連続的に往復掃引するため、往復時の像の重なりをはぶく必要がある。

当初、直線偏向方式のストリークカメラにおいて、サンプリングオシロスコープ、機械的光チョッパを用いて同期および光遮断を行なって光変調波形観測を行なった。光信号と掃引信号の同期におけるジッタおよび測定感度の問題があるため、その後ストリークカメラの掃引電源を改造して正弦波掃引方式を試みた。この場合、 GHz帯の変調信号の同期カウントダウンを行ない、約 100 MHzの掃引信号を得ている。この正弦波掃引方式をさ



図Ａ３．２　パルス変調波形の観測系

らに発展させ、 1 GHzの掃引を行なうようにしたものを変調素子の高速パルス応答測定に用いている。

図Ａ３．２に構成を示す。方向性結合器を用いて分割した 1 GHzの信号の一方を可変移相器を通したのち、ストリーク管の偏向電極に印加している。もう一方の信号はコムジェネレータを用いて 1 GHzの信号に同期した短パルスを発生させ、これを変調素子に印加する。このとき、掃引１周期の間に　１個のパルスが発生する。正弦波掃引では、掃引領域中央の掃引速度が最も速く、また比較的線形である。さらに同じ掃引領域を１周期の間に往復掃引する。したがって、観測波形が片側掃引時のみに存在させる必要がある。このため可変移相器を用いて掃引信号と変調パルスとの位相関係を微調整し、光パルス・ピークを掃引面中央に位置させている。

付録４　行列表示による式の導出

干渉形光変調素子およびそれを組み合わせた各種光回路の動作を簡便に評価するための方法を示し、それを用いて本文内の式の導出を行なう。

２入力２出力の光回路では、各端子を形成する導波路が単一モード導波路であり、各端子での反射を無視すると、２行２列の適当な行列を用いて入出力各端子での電界の関係が表わされる。

$$\begin{bmatrix} e_{10} \\ e_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{1i} \\ e_{2i} \end{bmatrix}$$

また、Ｙ分岐のように１入力２出力あるいは２入力１出力、さらにこれらを接続する直線導波路も放射モードあるいは高次モードを考慮にいれると同様な行列で入出力関係が表わされる。

表Ａ－１に、光集積回路でよく用いられる回路素子の入出力特性を表わす行列を示す。

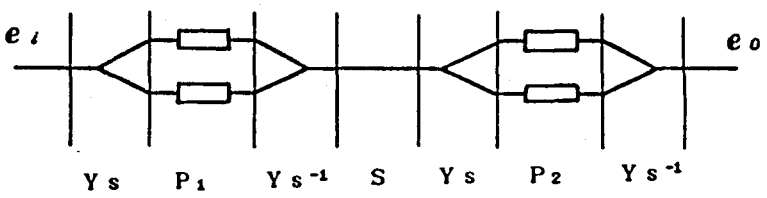
これらの行列表示を利用し、第４章の変調素子の縦続接続と並列配置の光回路特性導出の例を示す。

例１　干渉形光変調素子の縦続接続

図Ａ４．１に２つの干渉形光変調素子を縦続接続した場合の光回路要素に分割した状態を示す。　入力および出力光の振幅をそれぞれ、

$$\mathcal{E}_i = (e_{Pi},\ e_{Ai})^t, \quad \mathcal{E}_o = (e_{PO},\ e_{AO})^t$$

とすると表Ａ－１の行列を用いて入出力関係は次のように表わされる。



図Ａ４．１　干渉形光変調素子の縦続接続における光回路要素

$$\mathcal{e}_o = Y_s^{-1} \cdot P_2 \cdot Y_s \cdot S \cdot Y_s^{-1} \cdot P_1 \cdot Y_s \cdot \mathcal{e}_i$$

ここで記号Ｓで表わしている接続部の直線導波路において、基本モードは無損失で高次モードは減衰するとすれば、それぞれの伝搬定数が

$$\gamma_p = j\beta_p, \quad \gamma_h = \alpha_h + j\beta_h$$

で表わされ、また入力光の振幅が

$$\mathcal{e}_i = (e_{pi}, e_{hi})^t = (1, 0)^t$$

と仮定すると、光出力強度　$I_o = |e_{po}|^2 / 2$ は

$$\begin{aligned} I_o = {} & [1-\exp(-2\alpha_h \cdot L)] \cdot \cos^2\phi_1 \cdot \cos^2\phi_2 \cdot \\ & +\exp(-\alpha_h \cdot L)[4-3\exp(-\alpha_h \cdot L)]\cos^2(\phi_1+\phi_2) \\ & -4\exp(-\alpha_h \cdot L)[1-\exp(-\alpha_h \cdot L)]\cos^2(\phi_1-\phi_2) \end{aligned}$$

となり、

$$k_1 = -\exp(-2\ \alpha_A \cdot L)$$
$$k_2 = \exp(-\alpha_A \cdot L)[4-3\exp(-\alpha_A \cdot L)]$$
$$k_3 = 4\exp(-\alpha_A \cdot L)[1-\exp(-\alpha_A \cdot L)]$$

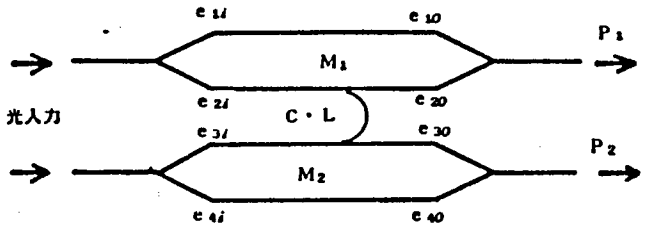
とおくと（４－４）式が得られる。

例２　接近した２つの干渉形光変調素子

干渉形光変調素子を並列に置き、両素子間で最も近接している平行導波路間でのみ結合が生じると仮定する。図Ａ４．２にそのようすを示す。簡単のため４本の平行導波路部分だけを考えると、４入力４出力の光回路となり、２入力２出力の回路での表現を拡張して行列表示ができる。図Ａ４．２に示した４本の平行導波路の入出力光の振幅を

$$\mathcal{E}_i = (e_{1i},\ e_{2i},\ e_{3i},\ e_{4i})^t$$
$$\mathcal{E}_o = (e_{1o},\ e_{2o},\ e_{3o},\ e_{4o})^t$$

とすると、これらの間の関係は４行４列の行列Ｍを用いて次のように表わ



図Ａ４．２　干渉形光変調素子の並列配置

される。

$$\mathcal{e}_o = M\mathcal{e}_i$$

行列Mは次のような成分を持つ。

$$M = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_1 L) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Pc_{11} & Pc_{12} & 0 \\ 0 & Pc_{21} & Pc_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp(-j\beta_4 L) \end{bmatrix}$$

ここで、Pc_{11}～Pc_{22}は表A－1の行列Pcの要素である。ただし、平行する4本の導波路の伝搬定数を図面上方から順にβ_1，β_2，β_3，β_4とし、またδおよびβ_aは次のように表わされる。

$$\delta = (\beta_2 - \beta_3)/2, \quad \beta_a = (\beta_2 + \beta_3)/2$$

これより、平行導波路出力端での光振幅　e_{10}～e_{40}が求まり、各素子の出力光強度　P_1，P_2は

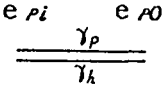
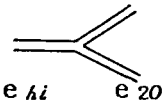
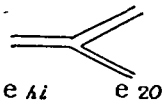
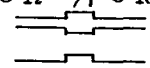
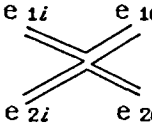
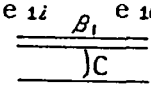
$$P_1 = |e_{10} + e_{20}|^2/2, \qquad P_2 = |e_{30} + e_{40}|^2/2$$

であるので、入力光振幅を

$$\mathcal{e}_i = (1, 1, 1, 1)^t$$

と仮定して、それぞれ（4－5），（4－6）式が得られる。

表A－1　光回路素子の行列表示

回路素子	入力　出力	略記号	行列
直線導波路	e_{pi}　e_{p0}  e_{hi}　e_{h0}	S	$\begin{pmatrix} \exp(-\gamma_p L) & 0 \\ 0 & \exp(-\gamma_h L) \end{pmatrix}$
対称Y分岐	e_{pi}　e_{10}  e_{hi}　e_{20}	Ys	$\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$
非対称Y分岐	e_{pi}　e_{10}  e_{hi}　e_{20}	Ya	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
平行導波路 （変調部）	e_{1i}　ϕ_1　e_{10}  e_{2i}　ϕ_2　e_{20}	Pm	$\begin{pmatrix} \exp(-j\phi_1) & 0 \\ 0 & \exp(-j\phi_2) \end{pmatrix}$
非対称X分岐	e_{1i}　e_{10}  e_{2i}　e_{20}	Xa	$\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$
平行導波路 （結合有り）	e_{1i}　β_1　e_{10}  e_{2i}　β_2　e_{20}	Pc	$\begin{pmatrix} Pc_{11} & Pc_{12} \\ Pc_{21} & Pc_{22} \end{pmatrix}$

ただし、　$\gamma_p = \alpha_p + j\beta_p$,　$\gamma_h = \alpha_h + j\beta_h$

$Pc_{11} = \exp(-j\beta a L) \cdot [\cos(s \cdot L) - j(\delta/s)\sin(s \cdot L)]$

$Pc_{12} = \exp(-j\beta a L) \cdot j(C/s)\sin(s \cdot L)$

$Pc_{21} = \exp(-j\beta a L) \cdot [-j(C/s)\sin(s \cdot L)]$

$Pc_{22} = \exp(-j\beta a L) \cdot [\cos(s \cdot L) + j(\delta/s)\sin(s \cdot L)]$

ここで、$\delta = (\beta_1 - \beta_2)/2$,　$\beta a = (\beta_1 + \beta_2)/2$

$s = \sqrt{\delta^2 + C^2}$

本研究に関する発表

I. 論文

1] Semiconductor Laser Output Modulated in GHz Frequency Region Observed by Image Tube Streak Camera
M. Izutsu, H. Haga, and T. Sueta
Electron. Lett. vol. 16, no. 14, p. 531, July 1980

2] 0 to 18 GHz Traveling-Wave Optical Intensity Modulator
M. Izutsu, H. Haga, and T. Sueta
Trans. IECE Japan, vol. E-63, no. 11, p. 817, Nov. 1980

3] Picosecond Signal Sampling and Multiplication by Using Integrated Tandem Modulators
M. Izutsu, H. Haga, and T. Sueta
IEEE J. Lightwave Tech., vol. LT-1, no. 1, p. 285, March 1983

4] An Integrated 1 ×4 High-Speed Optical Switch and its Application to Time Demultiplexer
H. Haga, M. Izutsu, and T. Sueta
to be published in IEEE J. Lightwave Tech., Feb. 1985

5] $LiNbO_3$ traveling-wave light modulator/switch reduced velocity mismatch with an etched slot
H. Haga, M. Izutsu, and T. Sueta
(投稿準備中)

II. 国際会議

1] An Integrated Optic 4-Channel Fast Time Demultiplexer
H. Haga, M. Izutsu, and T. Sueta
IOOC'83, 30B2-3, June 27-30, 1983

III. 研究会

1] 高速光強度変調波形の観測
井筒 雅之、 芳賀 宏、 末田 正
特定研究「光導波エレクトロニクス」第3回総合シンポジウム, S22, 1979

2] 進行波動作導波形ブッシュプル光変調素子
井筒 雅之、 芳賀 宏、 末田 正
電子通信学会技術研究報告, OQE80-37, 1980

3] 光変調素子の集積化によるピコ秒信号処理
芳賀 宏、 井筒 雅之、 末田 正
電子通信学会技術研究報告, OQE82-69, 1982

4] 集積化高速光タイムデマルチプレクサ
芳賀 宏、 井筒 雅之、 末田 正
輻射科学研究会, RS82-20, 1983

5] 集積化1×4高速光スイッチの試作
芳賀 宏、 井筒 雅之、 末田 正
特定研究「極微構造エレクトロニクス」第6回研究会, 1983

6] 単一モードY分岐およびX分岐光スイッチ

枝川　登、　芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
電子通信学会技術研究報告，OQE83-87，1984

7］進行波動作干渉形溝付ＬｉＮｂＯ₃ 光強度変調素子
芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
特定研究「極微構造エレクトロニクス」第８回研究会，1984

8］進行波動作分岐干渉形溝付ＬｉＮｂＯ₃ 光強度変調素子
芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
輻射科学研究会，RS84-15，1984

Ⅳ．学会

1］高速光強度変調波形の観測
芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
昭和５４年秋季第４０回応用物理学会，1a-R-6,1979

2］導波形光変調器アレイとその１次元フーリエ変換器への応用
芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
昭和５７年度電子通信学会総合全国大会，889,1982

3］高速光タイムデマルチプレクサ
芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
昭和５７年度電子通信学会光・電波部門大会，309,1982

4］単一正弦波駆動集積化４チャンネル高速光タイムデマルチプレクサ
芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
昭和５８年度電子通信学会総合全国大会，1051,1983

5］光変調素子の集積化によるピコ秒信号処理
芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
レーザー学会学術講演会第３回年次大会，21p Ⅲ-2，1983

6］ＬｉＮｂＯ₃ ３次元外拡散導波路の作製
芳賀　宏、　森田　二郎、　末田　正
昭和５９年度電子通信学会総合全国大会，1002，1984

7］スロットを用いたＬｉＮｂＯ₃ 単一モード導波路ビームスプリッタ
女鹿田　直之、　芳賀　宏、　末田　正
昭和５９年度電子通信学会総合全国大会，1063，1984

8］進行波動作ＬｉＮｂＯ₃ 光変調素子の速度非整合改善法
芳賀　宏、　末田　正
昭和５９年度電子通信学会総合全国大会，1097，1984

9］外拡散ＬｉＮｂＯ₃ 三次元単一モード導波路の光損傷
森田　二郎、芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
昭和５９年度電子通信学会光・電波部門大会，370，1984

１０］導波形光変調素子アレイ
太田　雅人、芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
昭和５９年度電子通信学会光・電波部門大会，380，1984

１１］スロットを用いたＬｉＮｂＯ₃ 単一モード導波路ビームスプリッタ　(2)
女鹿田　直之、　芳賀　宏、　井筒　雅之、　末田　正
昭和５９年度電子通信学会光・電波部門大会，403，1984