

| 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 LiNbO3 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、 LiNbO3 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

-i-

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 の損失およびインビ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

-ii -

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 LiNbO3 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 | - |
|-----|----|---|
| | | |

第2章 高速導波形光変調素子

| 2 | • | 1 | | 序 | 言 | | • | | | | | | | | | | | | | | ••••• | | | 5 |
|---|---|----|---|---|-----|-----|---|---|---|------------|------------|------------|---|--------|-------|------------|---|-------|---|----------|----------|-------|---------|----|
| 2 | • | 2 | | Ŧ | 涉刑 | 彡光 | 強 | 度 | 変 | 調 | 表 - | ₽ | | | | | | ••••• | | | | | ••••• | 5 |
| | 2 | 2. | 2 | • | 1 | Ŧ | 涉 | 形 | 光 | 強度 | 度羽 | を 調 | 素 | 子(| の構 | 帯 成 | と | 勆作 | | ••••• | | ••••• | | 5 |
| | 2 | 2. | 2 | • | 2 | 変 | 調 | 用 | 電 | 気[| 回日 | 洛 | | •••••• | | | | | | | ••••• | ••••• | | 8 |
| 2 | • | 3 | | L | i N | l p | 0 | Э | 導 | 波开 | 创 | 光変 | 調 | 素 | 子の | D試 | 作 | ・実 | 験 | | | | | 10 |
| | 2 | 2. | 3 | • | 1 | L | i | N | b | 0 a | 3 | У | 板 | と | z₩ | 反 | | | | | •••••••• | | | 10 |
| | 2 | 2. | 3 | • | 2 | L | i | N | b | 0 e | ; = | 于涉 | 形 | 光 | 旗月 | 医変 | 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 | 涉形 | 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 | | L | i N | b O 3 干涉形溝付光変調素子 ———————————————————————————————————— | 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 |

- iv -

| | 3 | • | 3 | • | 3 | 溝に | よ | る速度 | 吏 手 | 非整合改善 | 効果 | | 27 |
|---|---|---|---|---|----|-----|-------|-----|------------|-------|----|--------|----|
| | 3 | • | 3 | • | 4 | 溝に | よ | る変計 | 問言 | 電界分布の | 変化 | | 29 |
| 3 | • | 4 | | 素 | 子の | D設計 | ٤ | 試作 | | | | | 30 |
| 3 | • | 5 | | 変 | 調測 | ミ験 | ••••• | | | | | | 31 |
| 3 | • | 6 | | 結 | 盲 | | | | | | | ****** | 35 |

第4章 干渉形光変調素子の集積化

| 4 | • | 1 | 序 | 「言 | | 37 |
|---|---|---|----|------|-----------------|----|
| 4 | • | 2 | F | 步形 | 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 | Ŧ | - 渉形 | 光変調素子の並列集積化 | 44 |
| | 4 | • | з. | 1 | 光波による素子間の干渉 | 45 |
| | 4 | • | з. | 2 | 変調電極間での干渉 | 47 |
| 4 | • | 4 | 紀 | 皆 | | 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

 5.2
 集積化1×4光スイッチ

 5.2.4
 相補出力付光変調素子

 5.2.2
 1×4光スイッチの構成

 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

-v -

| 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 | |
| 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 | |

| 第6章 | 結論 | | 70 | τ |
|-----|----|---|----|---|
| | | · | | |

| 謝辞 | - | 74 | |
|----|---|----|--|
| | | | |

| | • |
|------|----|
| 参考文献 | 75 |

| 27 | ۲ ス | | |
|-------|------------|----------------------------|----|
| 付録 | 1 | T i 拡散L i N b O 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 |
| | | | |
| 周 : 古 | 这主 | Ĩ∆ ↔ | on |

| 関連発表論文 | 89 |
|--------|----|
| | |
| | |

-vi-

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Δβ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。

--- 1 ---

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

— 2 —

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 LiNbOa 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、光を用いたビ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

- 3 -

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、 LiNbO3 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 干涉形光強度変調素子

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。

- 5 -



図2.1 干涉形光強度変調素子

 $I_{0} = I_{i} \cos^{2} (\Gamma / 2 + \Phi_{0})$ (2-1)

I i : 入射光強度
 I o : 出射光強度
 Γ = φ₁ - φ₂ : リターデーション
 φ₁, φ₂ : 各位相変調部での移相量
 Φ₀ : 無変調時に存在する移相量差

ここで、

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

- 6 -

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



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

として動作する。たとえば、 LiNbO3 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ボ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φο、変調電界による位相変化 分をδφとすると、それぞれ次のように表わされる。

 $\phi_1 = \phi_0 + \delta \phi, \phi_2 = \phi_0 - \delta \phi$ 出力光強度は、両移相量の差($\Gamma = \phi_1 - \phi_2 = 2 \delta \phi$)に応じ、

 $I o = I i c o s^2 (\delta \phi)$

となり、この変調素子ではいわゆるブッシュブル動作が得られる。光路長 による移相量 øo 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

- 7 -

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、cos² (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(ボッケルス効果)の応答速度は高速であり、たとえ

- 8 -

ば LiNb03 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、電極の長さしが電極上での変調波の 波長入[~co/(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。LiNbO₃の平行平面電極構成では、N_m ≒4.2 であるの で、f・入≒7 GH2・cmとなる。すなわち、電極上での波長は周波数 1 GH2 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 Δ f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、LiNbO₃ では、

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

である。ここで、△f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、 LiNbO3 では、

 $\Delta \mathbf{f} \cdot \mathbf{L} = 6.7 \text{ GHz} \cdot \text{cm}$

である。

いずれの場合も、ムfは電極長Lによって制限されるが、同一電極長では、 LiNbO3 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 LiNbO3 導波形光変調素子の試作・実験

<u>2.3.1 LiNbO3 y板とz板</u>

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、 LiNbO3 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(ボッケルス)定数が大きい。

といった利点があるため、よく用いられる。

LiNb03 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

-10 -



(b)Z板使用の例

図2.3 LiNbO3干涉形光強度変調素子

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。 LiNbO3 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

-11 -

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 7 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。

<u>2.3.2</u>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、2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

-12 -



図2.5 試作素子の導波路及び電極パターン

| | | LiNbO з z板 | (5x21) | x0.5 mm ³) |
|-------|-------|------------|--------|------------------------|
| 光導波路 | | | Ti 拉 | 、散 |
| | Ti 膜厚 | | 35 | nm |
| | 拡散温度 | | 1010 | °C |
| • | 拡散時間 | | • | 7 h |
| | 拡散雰囲気 | 4 | 7 | ルゴン |
| バッファ層 | | | Si02 | (高周波スパッタ) |
| | 膜厚 | | 0.11 | μ m |
| 電極 | | | AI | (抵抗加熱蒸着) |
| | 膜厚 | | 2.1 | μ m |

表2.1 作製条件

- 13 -

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。

| | TM-mode | TE-mode | |
|----------|---------|---------|--|
| 半波長電圧(V) | 8.8 | 11.9 | |
| 消光比 (dB) | 17 | 15 | |

表2.2 半波長(スイッチ).電圧と消光比

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 Δ f 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/ Δ f = 11.3 mW/GHz、V/ Δ f = 0.77 V/GHz である。

- 14 -



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、 LiNbO3 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 LiNb03 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△fは、11.5 GHzと理論値によく一致した広帯域な特性を得た。

LiNbO3 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(△f・L≒ 6.7 GHz・cm)
 といった問題点を解決することが望まれる。

- 16 -

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、インビ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 LiNbO3 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。

- 17 -

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本の人力導 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



3.1 Y分岐による
 合波出力部での
 光波のふるまい

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。

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]。

- 18 -



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Pho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Ph1 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

- 19 -

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P1 / P2 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 LiNbO₃ 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 低波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 _{AO}、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 _{AO}とし、

入力光振幅を $e_i = (1, 0)^t$ 、出力光振幅を $e_o = (e_{AO}, e_{AO})^t$ 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、Y s、P m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Y s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。

-20 -

 $I o = |e_{PO}|^2 / 2$

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

ただし、

 $\delta = \Delta \beta / 2$

Δβ: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

- 21 -

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。

 $\Delta \mathbf{f} \cdot \mathbf{L} = \mathbf{1} \cdot \mathbf{4} \mathbf{c} / (\pi \cdot |\mathbf{N}_m - \mathbf{N}_{\ell}|) \qquad (3-3)$

L:電極長

c:真空中での光速

Ne:光波に対する等価屈折率

Nm: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koとの比β/ko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。 LiNbO3 を用いた平行平面電極構造の変調素子を例にとると、Nm ≒4.2、 Nl ≒ 2.2であり、このとき Δf・L=6.7 Gll2・cmである。 素子を広 帯域化するには、電極長しを短くすればよいが、帯域と同様に変調電圧V はし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 めにしを長くすると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/Δf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

-22 -

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√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ビ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 $\alpha = 2$ dB/cm で は 8 GHz、 $\alpha = 4$ では 5 GHzまで低下する。

図3.6は線路の特性インビーダンスと電源および負荷インビーダンス との不整合の影響を示している。インビ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、とくに低インビー 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 ビーダンス整合していない場合である。インビ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ビーダンス整合お 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。

- 23 -



3.3 干涉形溝付光変調素子

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、いわゆるブッシュブ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 干涉形溝付光変調素子

- 25 -

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 満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、T E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 満の深さによる 消光比の変化

- 26 -

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、 LiNbOa 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、 Ng=2.2 (波長 633 nm), Nm = 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 LiNb0a 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Nm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 mで20 %,6 m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 um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。

- 27 -


- 28 -

3.3.4 満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 m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



- 29 -

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。

<u>3.4 素子の設計と試作</u>

図3.14に素子の具体的寸法を示す。作製には、まず、 LiNbO3 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、 SiO2 バッファ層を介して AI 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

— 30 —

LiNb03 基板エッチングマスクには7µm厚の AI を用いて、連続5時間 エッチングにより深さ 4.3µmの満を形成した。このとき、エッチング条件 は、CF4 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。満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。 Si02 スパッタ膜をバッファ層とした場合、いわゆるD C 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 Si02 が存在しないようにパターン化している。電極幅は 10 µm および 20 µmのものを作製した。図3.15に電極幅 10 µmの素子のSEM写真 を示す。この場合の電極膜厚は、2.2 µmである。



図3.15 試作素子のSEM写真例

<u>3.5 変調実験</u>

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 mm に対して溝が無い場合および4.3 µm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Nm=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

- 31 -

| 基板 | Li | NbO 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 | | SiOz (高周波スパッタ) |
| | 膜厚 | 80 mri |
| 電極 | <u></u> | Al (電子ビーム蒸着) |
| | 膜厚 | 3 μm |
| 満 | | 反応性イオンエッチング |
| | エッチングガ | ス CF4 50 cc/min |
| | 圧力 | 0.025 Torr |
| | パワー | 200 W |
| | 時間 | 5 h |

表3.1 作製条件

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 m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 m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 m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,3 V 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 Nm = 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

- 33 -

 $P / \Delta f = 4.2 \text{ mW/GHz}$ 、 $V / \Delta f = 0.25 \text{ V/GHz}$ 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 びインビーダンス不整合(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 $P / \Delta f = 12 \text{ mV/GHz}$ 、 $V / \Delta f = 0.77 \text{ V/GHz}[24]に対して、同じ電極長でありながら、電極間隔$ 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。

| | 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(d B) | 18 | 17 | |
| 3-dB带域幅(GHz) | 12 | 11.5 | |
| $P \neq \Delta f$ (mW $\neq G H z$) | 4.2 | 11.3 | |
| $V \neq \Delta f$ ($V \neq G H z$) | 0.25 | 0.77 | |

表3.2 2章と3章の変調素子の比較

使用波長: λ = 633 nm, ΤΜモード

- 34 -

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) LiNbO3 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 LiNbO3 導波路を用いた素子で
 20 dB 以上の消光比を得るには 12 m程度以上の間隔が必要であり、
 6 m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

- 35 -

たりの変調電力および変調電圧はそれぞれ、 P/ $\Delta f = 4.2 \text{ mW/GHz}$, V/ $\Delta f = 0.25 \text{ V/GHz}$ 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「1、「2とする

- 37 -



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、

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

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重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

— 38 —

のように表わされる。(付録4参照)

$$T (\Gamma_{1} \cdot \Gamma_{2}) = k_{1} \cdot \cos^{2} (\Gamma_{1} / 2) \cdot \cos^{2} (\Gamma_{2} / 2) + k_{2} \cdot \cos^{2} [(\Gamma_{1} + \Gamma_{2}) / 2] - k_{3} \cdot \cos^{2} [(\Gamma_{1} - \Gamma_{2}) / 2] (4-4)$$

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(k1,k2,k3)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 , $k_3 \neq 0$ 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

- 39 -

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、k2, k3 がk1 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。

- 40 -

4.2.2 集積化光信号相関器の試作・実験

次に、LiNb03 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



| 光学バ | イアス | 検出器の応答速度 | 可能な信号処理例 |
|-------|-------|----------|-------------|
| Mod.1 | Mod.2 | | |
| 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 ∩ B) |
| 0 | λ/2 | 高速 | (A n B) |
| λ/2 | λ / 2 | 高速 | NOR (AUB) |

表4.1 光強度変調素子の縦続接続で可能な信号処理例

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

- 41 -



図4.4 試作素子のパターン

| 基板 | LiNbO g 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 | | SiO2 (高周波スパッタ) |
| | 膜厚 | 0.08 μm |
| 電極. | ······································ | AI (電子ビーム蒸着) |
| · | 膜厚 | 2.1 μm |

表4.2 作製条件

- 42 -

| | 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(d B) | 18 | 19 |
| 3-dB带域幅(GHz) | 3.2 | 11.5 ¹ |
| パルス応答 ² (ps |) | 52 |

表4.3 各変調素子の基本特性

使用波長: λ = 633 nm, ΤΕモード

1 計算值

2 半値全幅 62 ps, 電圧 9 Vの電気バルスで変調したときの 出力光バルス半値全幅

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。



 50 kllzの正弦波,
 10 MHz および 100 MHzの正弦波

 繰り返し周波数 500 kllzの方形

 パルス

 図4,5 信号乗算実験結果

- 43 -

次に、ビコ秒領域における 信号相関実験を行なった。図 4.6は、2 GH2 の正弦波と 繰り返し 1 GH2,50 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O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。

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k2, k3 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

- 44 -

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



図4.7 並列変調素子間の光波干渉

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 M1 は無変調状態であり、素子M2 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、M1 の出力P1 は一定であり、M2 の出力P2 だけ が変化する。結合係数をCとしたとき M1, M2 の出力P1, P2 は、 次のようになる(付録4参照)。

.

 $P_{1} = \{1 + \cos(\delta \cdot L) \cdot \cos(s \cdot L)\}$

+[$(\delta \cdot L - C \cdot L)/(s \cdot L)$]cos $(\delta \cdot L)$ ·sin $(s \cdot L)$ }²/2 (4-5)

- 45 -

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

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M₂ からM₁ 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M₂ の変調によって 生じるM₁ の出力変化分 Δ P₁ と無変調時の M₁ の最大出力P₁ との比 Δ P₁ /P₁ 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・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。 図4.9はC・Lをパラメータとして M₁ 自身の変調出力P₁ の変化の様子を示している。



- 46 -

ー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章で示した満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M5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。

- 47 -



図4.10 導波路バターン 図4.11 電極の部分写真

| 表4.4.変調素子 | ² M 5 | から他素う | 子へのク | ロス | トーク |
|-----------|------------------|-------|------|----|-----|
|-----------|------------------|-------|------|----|-----|

| 変調素子 | Mı | Μz | Mэ | M 4 | M 5 | мь | M ₇ | Мв |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|-----|
| ሳወスኑ-ሳ (dB) | -34 | -29 | -23 | -12 | _ | -18 | -26 | -32 |



- 48 -

M5 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、これらの電界はブッシュブル動作を行なう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M5 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 SiO2 バッファ層を介して、厚さ0.5 µmの AI 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。

- 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 LiNb03 基板上に2つの素子を集積した光信号

- 49 --

相関器を試作し、2 Gllz 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・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。</p>
- 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 m、電極間隔7 mの各素子が素子間の電極間隔 11 m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ノデマル 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

- 51 -

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 LiNbO3 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 <u>集積化1×4光スイッチ</u>

5.2.1 非対称 X 分岐を用いた相補出力付于 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。

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5.1 相補出力付 干涉形光変調素子

- 52 --





図5.2 相補出力付干涉形光変調素子の変調特性

- 53 -

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

- 54 -

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≤j≤N)の素子に加える電圧を

 $V_{j}(t) = 2^{J-1}V\pi \cdot s in (2\pi f t)$ (5-1)

とすると、電圧に対する透過特性は、

 $T j (V) = \cos^{2} (\pi \cdot V j / 2 V \pi) \qquad (5-2)$

となる。時間に対する特性は

 $T j (t) = cos^2 [2^{J-1}s in (2\pi f t) \cdot \pi/2]$

(5 - 3)

- 55 -

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) =
$$\prod_{j=1}^{N} c \circ s^{2} [2^{j+1} s i n (2\pi f t) \cdot \pi/2]$$

(5-4)
変調電圧を
V j (t) = j · V π · s i n (2 π f t)
f ることも可能であり、そのときの全体の透過特性は、
T (t) = $\prod_{j=1}^{N} c \circ s^{2} [j \cdot s i n (2\pi f t) \cdot \pi/2]$
(5-6)
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

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。



ک

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 $V \pi_1$ に対して、各素子の半波長電 圧を $V \pi_j = V \pi_1 / 2^{J-1}$ あるいは、 $V \pi_j = V \pi_1 / j$ とすれば、

$$V_{j} = V_{\pi_{1}} \cdot s_{in} (2\pi f t)$$
 (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

- 57 -

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Nod.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 V n 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。

- 58 -



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。

— 59 —

導波路バターン設計

- 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 μ mであるが、非対称分岐部では、4 μ m、3 μ m 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 3 0 および 11.4 μ 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 LiNbO3 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、 SiO2 バッファ層および AI 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。

- 60 -



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 з z‡ | 反 (5x39 | x0.5 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 | | | Si02 | (高周波スパッタ) |
| | 膜厚 | | 150 | ກຫ |
| 電極 | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | | Al | (電子ビーム蒸着) |
| • | 膜厚 | | 500 | nm |
| | | | | |

- 61 -



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ビ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

- 62 -

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。

.

| 変調素子 | 半波長(スイッチ)電圧(Ⅴ) | 消光比(d B) |
|------------|----------------|----------|
| Mod. 1 | 6.6 | > 1 8 |
| Mods. 2, 3 | 13.3 | > 1 8 |

表5、2 半波長(スイッチ)電圧と消光比

使用光: $\lambda = 633$ 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

<u>5.6 光タイムデマルチプレクサ実験</u>

<u>5.6.1 低周波動作実験</u>

5.3.2節で述べた4チャンネルの光タ ³⁶ イムデマルチプレクサの動作を確認するため ⁶⁰ 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。ビ 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}



図5.12 低周波实验结果

図5.12に観測結果を示す。最上部の写

- 64 -

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 GH2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 GH2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 GH2 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。



- 65 -

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。測定する光出力のビ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)から各出力のビ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、ビークが掃引面端(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単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、光バル



(a) PORT 3 (b) PORT 1

図5.14 観測したストリーク像の例

- 66 -



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、

- 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 GH2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。

- 68 -

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 LiNb03 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△ f 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) LiNbO3 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 LiNbO3 導波路を用い

- 70 -

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/△f = 4.2 mW/GHz,
 V/△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 LiNbO3 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

- 72 -

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、電極のインビーダンス不整合(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 とのインビ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。

- 73 -

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、森本別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。

- 74 -

- (1) S.E.Miller:Bell Syst.Tech. J., <u>48</u>, 2059(1969).
- (2) D.B.Anderson: IEEE Spectrum, <u>12</u>, 22(1978).
- (3) D.Mergerian, E.C.Malarkey: 3rd 100C, 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, II. Ilaga, T. Sueta: Trans. IECE Japan, <u>E-63</u>, 817(1980).
- (7) K.Kubota, J.Noda, O.Nikami: 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., <u>19</u>, 1339(1983).
- (10) 0.Nikami, J.Noda: Appl. Phys. Lett., <u>33</u>,856(1978).
- (11) II.Kogelnik, R.V.Schmidt: IEEE J.Quantum Electron., 28, 503(1976).
- (12) P.S.Cross, R.A.Baumgartne, B.H.Kolner: Appl. Phys.Lett., <u>44</u>, 486(1982).
- (13) L.A.Nolter-Orr, H.A. Haus, F.J. Leonberger: IEEE J.Quantum Electron., <u>19</u>, 1877 (1983).
- (14) E.A.J.Marcalili: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., <u>44</u>, 486(1984).
- (18) II.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) N.Izutsu, S.Shikama, T.Sueta: IEEE J.Quantum Electron., 17, 2225(1980).
- (22) II.F.Talor: Appl. Opt., 17, 1493(1978).
- (23) M.Kondo,Y.Ohta,M.Fujiwara,N.Sakaguchi:IEEE J.Quantum Electron.,<u>18</u>, 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.llaga, M.Izutsu, T.Suet:4th 100C, 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., <u>35</u>, 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., <u>15</u>, 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, <u>15</u>, 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.McNahon: Electon. Lett., 14, 283(1978).

(44) K.Mitsunaga,K.Murakami,M.Masuda,J.Koyama:Appl.Opt.,<u>19</u>,22(1980).

(45)芳賀、井筒、末田:昭和54年秋季第40回応用物理学会,la-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).

- 76 -

<u>付録1_Ti拡散LiNbO3光導波路の作製法</u>

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。 LiNbO3 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LiNbO3光導波路の作製法

- 77 -

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 LiNbO3 光導波路においてはLi2 0 外拡散と光損傷が問題とな る。Li2 0 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、 LiNbO3 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 7 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。

- 78 -

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、Ι,Ι-ΔΙ となる。変調波による位相 変化は、バイアス量 Δφ。を考慮して、

 $\Delta \phi = \Delta \phi_0 + \Delta \phi_m \operatorname{cos}(\omega_m \operatorname{t})$ となり、出力光強度の瞬時値 I instは、

- 79 --

I inst=I₀ s i n² [($\Delta \phi_0 + \Delta \phi_m \cos(\omega_m t)$)/2] したがって、

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

 $= (I_0 / 2) (1 - \cos \Delta \phi_0 \cdot J_0 (\Delta \phi_m))$ - 5,

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

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

よって、Ιο およびΔΙを測定すると、Δφm がわかる。



-80-

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

- 81 -

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、 Gll2帯の変調信号の同期カウントダウ ンを行ない、約 100 Mll2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

- 82 -

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バ 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・ビ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。

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

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、

 $e_i = (e_{Pi}, e_{Ai})^t$, $e_o = (e_{AO}, e_{AO})^t$

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。

- 84 -



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

 $e_{o} = Y s^{-1} \cdot P_{2} \cdot Y s \cdot S \cdot Y s^{-1} \cdot P_{1} \cdot Y s \cdot e_{i}$

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滅衰するとすれば、それぞれの伝搬定数が

 $\gamma_P = j \beta_P$, $\gamma_h = \alpha_h + j \beta_h$

で表わされ、また入力光の振幅が

$$\mathcal{\mathcal{C}}_{i} = (\mathbf{e}_{Pi}, \mathbf{e}_{Ai})^{t} = (1, 0)^{t}$$

と仮定すると、光出力強度 $Io = |e_{AO}|^2 / 2$ は

 $I o = [1 - \exp(-2\alpha \wedge \cdot L)] \cdot \cos^2 \phi_1 \cdot \cos^2 \phi_2 \cdot \\ + \exp(-\alpha \wedge \cdot L)[4 - 3\exp(-\alpha \wedge \cdot L)]\cos^2 (\phi_1 + \phi_2) \\ - 4\exp(-\alpha \wedge \cdot L)[1 - \exp(-\alpha \wedge \cdot L)]\cos^2 (\phi_1 - \phi_2)$

- 85 -

となり、

 $k_{1} = -\exp(-2 \alpha \wedge \cdot L)$ $k_{2} = \exp(-\alpha \wedge \cdot L)[4 - 3\exp(-\alpha \wedge \cdot L)]$ $k_{3} = 4\exp(-\alpha \wedge \cdot L)[1 - \exp(-\alpha \wedge \cdot L)]$

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人力4出力の光回路と なり、2人力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

 $e_{i} = (e_{1i}, e_{2i}, e_{3i}, e_{4i})^{t}$ $e_{0} = (e_{10}, e_{20}, e_{30}, e_{40})^{t}$

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 干涉形光変調素子の並列配置

- 86 -

される。

$$M = \begin{bmatrix} exp(\neg i \beta_{1} L) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Pc_{11} & Pc_{12} & 0 \\ 0 & Pc_{21} & Pc_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & exp(\neg i \beta_{4} L) \end{bmatrix}$$

ここで、 $Pc_{11} \sim Pc_{22}$ は表A – 1の行列P c 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。

 $\delta = (\beta_2 - \beta_3) / 2, \ \beta a = (\beta_2 + \beta_3) / 2$

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 P1, P2 は

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

であるので、入力光振幅を

 $e_i = (1, 1, 1, 1)^t$

と仮定して、それぞれ(4-5),(4-6)式が得られる。

- 87 -

| 回路素子 | 入力 | 出力 | 略記号 | 行列 |
|-----------------|----------------------------|---|-----|---|
| 直線導波路 | е <i>рі</i> | е <i>р</i> о Ур | S | $\begin{pmatrix} \exp(-\gamma \rho L) & 0 \\ 0 & \exp(-\gamma \Lambda L) \end{pmatrix}$ |
| 対称Y分歧 | е <i>кі</i> е <i>гі</i> | е <i>ко</i> е 10 | Y s | $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ |
| 非対称Y分岐 | e ki e ri | e 20 e 10 | Y a | $\left(\begin{array}{cc} 1 & 0\\ 0 & 1 \end{array}\right)$ |
| 平行導波路 (変調部) | е <i>кі</i> е <i>іі</i> | ¢ ₁ e 10 | P m | $\begin{pmatrix} \exp(-i\phi_1) & 0 \\ 0 & \exp(-i\phi_2) \end{pmatrix}$ |
| 非対称X分歧 | e _{2i} g | e 10 | Ха | $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ |
| 平行導波路 (結合有り) | e_{2i} e_{1i} e_{2i} | e_{20} $\theta_1 = 10$ bc bc bc bc bc bc bc bc | Рc | $\begin{pmatrix} P c_{11} & P c_{12} \\ P c_{21} & P c_{22} \end{pmatrix}$ |

光回路素子の行列表示

表A-1

| ただし、 | $\gamma_{P} = \alpha_{P} + i \beta_{P}$, $\gamma_{A} = \alpha_{A} + i \beta_{A}$ |
|------|--|
| | $P c_{11} = exp (-j \beta a L) \cdot [cos(s \cdot L) - j(\delta/s)sin(s \cdot L)]$ |
| | $P c_{12} = exp (-i \beta a L) \cdot j(C/s)sin(s \cdot L)$ |
| | $P c_{21} = exp (\neg \beta a L) \cdot [-j(C/s)sin(s \cdot L)]$ |
| | P c $_{22}$ = exp (-; β a L) · [cos(s·L)+j(δ /s)sin(s·L)] |
| ここで、 | $\delta = (\beta_1 - \beta_2) / 2, \beta_a = (\beta_1 + \beta_2) / 2$ |
| | $s = \sqrt{\delta^2 + C^2}$ |

- 88 -

本研究に関する発表

| 1. 論文 |
|---|
| 1] Semiconductor Laser Output Nodulated in GHz Frequency Region |
| Observed by Image Tube Streak Camera |
| N.Izutsu, H.Haga, and T.Sueta |
| Electron.Lell.vol.16,no.14,p.531,July 1980 |
| 2] O to 18 GHz Traveling-Vave 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 Nodulators |
| M.Izutsu, H.Haga, and T.Sueta |
| IEEE J.Lightwave Tech.,vol.LT-1,no.1,p.285,Narch 1983 |
| 4] An Integrated 1 $	imes$ 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 |
| II. Ilaga, M. Izutsu, and T. Sueta |
| (投稿準備中) |
| |
| 1] An Integrated Optic 4-Channel Fast Time Demultiplexer |
| II. Haga, M. Izulsu, and T. Sueta |
| 100C'83, 30B2-3, June 27-30, 1983 |
| |
| 1」 高速光強度変調波形の視測 |
| 井筒 雅之、 芳賀 宏、 末田 止 |
| 特定研究「光導波エレクトロニクス」第3回総合シンボジウム, 522,1979 |
| 2」進行波動作導波形フッシュフル光変調素子 |
| 升同 雅之、 方貨 宏、 木田 止 第二次后带人计算环切开机止 04500.02 1000 |
| 電子通信子会技術研究報告, UUL80~37, 1980 の1.必応知事での進行ルントスピッ私信号加州 |
| 3」 元変詞系十の集損化によるヒコ杉信亏処理 お加一の 北欧 町立 キロ エ |
| 万頁 本、 升固 雅之、 木田 比 電式通信受会性影理究相化 00.592,60 10.92 |
| 电丁坦信子云汉州研究報告, 04C62~09, 1962 41 集積化高速必力ノレニマルチプレクサ |
| 4」朱仭化向圧ルフィムティルアプレクリーニー 二本朝 中 七弦 唯力 古田 正 |
| 万具 ム丶 升间 准之丶 木口 LC 桓射利受研究会 DC99_90 1099 |
| 福和科子明元云, 1502-20, 1505 |
| |
| 万兵 ム、 万西 雅仁、 不再 正 特定研究『極微構造エレクトロックフェ第6回研究会 1983 |
| 61 単一チード V分岐お上げ 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 71 進行波動作干涉形満付L i N b O a 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] 進行波動作分岐干涉形溝付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、 非简 雅之、 末田 正 昭和54年秋季第40回応用物理学会, la-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ビコ秒信号処理 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 Ш-2,1983 6] L i N b O 3 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 末田 正 芳賀 宏、 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

-90-

