

高速光変調器



技術解説

末田 正*

1. まえがき

光波を電磁波の一つとして見ると、その特長は周波数の高い点にあるといえる。マイクロ波に比べるとその値は10万～100万倍にもなる。したがって、光波を搬送波として利用すれば、極めて多量の情報をこれに載せて伝送することができる筈である。高速光変調器は、このような光波の高速度性を生かす光制御デバイスとして最近注目されている。また、情報伝送だけでなく、光波を利用した情報処理系においても、処理の高速化を実現するために、高速光変調器/スイッチへの期待が高まっている。

現在、伝送速度400Mb/s程度の光ファイバ通信システムは、半導体レーザの直接変調方式によって実用化されており、1.6Gb/sのものが極く最近用いられ始めている。しかし、これらは、光波が潜在的に持っている高速度性には程遠く、一層の高速化（あるいは広帯域化）が追及される所以である。

さて、近年、バルク形式の光デバイスに代わって、光導波路を利用した導波形式のもの（導波形式光デバイス）が注目されるようになった。導波形式による光素子の構成、すなわち、素子を適当な基板上に形成された光導波路を利用して構成することは、多数の素子を一枚の基板上に集積して、いわゆる「光集積回路」を実現する上で不可欠であり、光回路の小型化、高信頼化、経済化などを図る上で極めて重要な技術であることはいうまでもない。

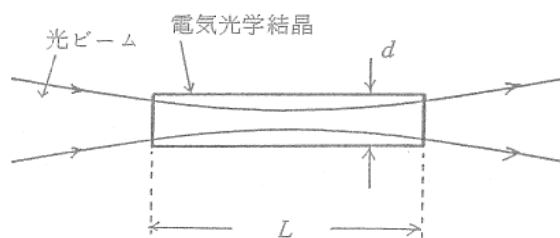
一方、光制御素子の観点から見ると、導波形式による構成は、素子の高性能化という点でも意義がある。すなわち、小型化によって高速動

作に有利となり、さらに、微小な部分に光パワーあるいは制御信号電力がとじ込められることによって、光制御の基礎となる非線形性が強調されて高効率化が可能となる。実際、数GHz以上の帯域幅を持つ光変調器は、導波形式の構成法を採ることによって初めて現実のものになったといえる。

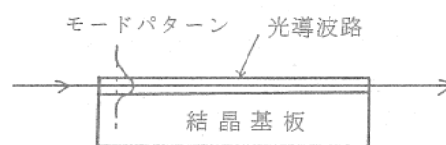
本文では、ここ数年来、われわれが行ってきた研究を中心として、数ギガヘルツ以上の変調周波数帯域幅あるいは数百ピコ秒以下の動作時間を持つ導波形式光変調素子について述べ、さらにその集積化についても触れる。

2. なぜ導波形式か

図1に示すように、光変調器における光伝搬形式には、バルク形と導波形式がある。横形変調器の場合、用いる電気光学結晶の長さ L と断面寸法 d との比（アスペクト比）を大きくすることによって効率を高くすることができる。しかし、たとえ理想的なコヒーレント光源であっても、光ビームをあまり細くすると回折効果によってビームが広がる。したがって、細長い結晶



(a) バルク形式



(b) 導波形式

図1 変調器における光伝搬形式

*末田 正 (Tadasi SUETA), 大阪大学基礎工学部, 電気工学科, 教授, 工学博士, 電気機器講座

に光ビームを入射させても側壁に当たってしまい、完全に結晶を通過することができなくなる。同図(a)のようなバルク形素子の場合、回折制限によって、入射光ビームを適当なレンズで絞ってこの素子を通過させるためには、 d/L の値がある限度以上でなければならないことが示される。実際の結晶では、たとえば $L=1\text{ cm}$ に対して $d=0.2\text{ mm}$ 程度であり、アスペクト比は約50となる。

一方、同図(b)に示すように、導波形式の場合、導波光は導波路構造によって決まる一定の横方向分布(モードパターン)を持っており、光波が伝搬して行っても広がることはない。したがって、アスペクト比を大きくすることができ、格段に変調効率を高くすることが可能である。実際にも、 d は数 $\mu\text{ m}$ の程度であり、バルク形のものに比べると桁違いに大きなアスペクト比を得ることができる。

後述するように、光変調器の性能を(変調電力/帯域幅)の数値で表すものとする、バルク形の場合、数 mW/MHz 程度が典型的な値であるのに対し、導波形では、数 mW/GHz のものも実現されている。すなわち、3桁におよび高性能化が達成されていることになる。

3. 導波形光位相変調器

図2は、導波形光位相変調器の概念を示している。まず、電気光学結晶(たとえば、ニオブ酸リチウム LiNbO_3)の基板上に光導波路を形成する(LiNbO_3 の場合、チタンTiを熱拡散させるのが代表的な方法)。Ti拡散された部分の屈折率が周辺より少し大きくなり、これによって導波路が作られる。つぎに、適当な金属膜を付けて変調電極を形成する。

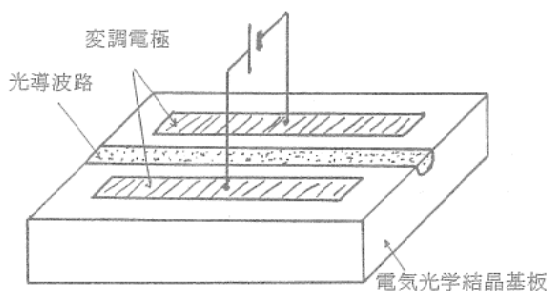


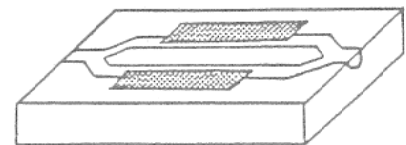
図2 導波形光位相変調器の概念

図の場合には、導波路が電極の中間にあり、電界は基板面に平行となる。導波路を、いずれかの電極の下に置くと、面に垂直な方向に電界を生じる。 LiNbO_3 基板の場合、 y カットであれば前者の、 z カットであれば後者の配置をとる。

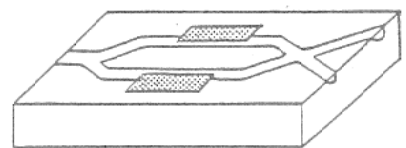
いずれにしても、結晶軸、光伝搬方向、偏光面、変調電界方向を適当に選んで、変調電圧を印加すると、導波路部分に生じた電界によって、屈折率(したがって位相定数)が変化し、結晶を通過する光波の位相が変化する。すなわち、電気光学効果の直接の結果として光波の位相変調が行われる。

4. 導波形光強度変調器

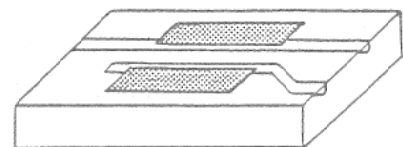
光強度変調を得るには、なんらかの方法で、位相変化を強度変化に変換する必要がある。バルク形の場合には、いわゆる直交ニコル法が用いられるが、高速導波形式素子の場合には、干渉



(a) YY プッシュプル干渉計形



(b) YX プッシュプル干渉計形



(c) 方向性結合器形

図3 導波形光強度変調器

計法あるいは方向性結合器法の用いられることが多い。前者の例を図3(a)(b)に示す。これらは、一枚の基板上に作成された一種のマッハツェンダ形干渉計である。適当な変調電極によって、2つの導波路に互に異なった変調電界（普通は等量逆符号）を印加する。両導波路における光波の位相変化量の差（リターデーション）を $\Delta\phi$ とすると、(a)の場合、入力光パワー I_0 に対する出力光パワー I は、損失の影響を無視すると

$$I = I_0 \cos^2 \Delta\phi \quad (1)$$

で表される。(b)の場合、干渉計の出力側に非対称X分岐と呼ばれるハイブリッド回路が付けられ、一方の出力導波路には式(1)の光パワーが、他方の導波路には

$$I = I_0 \sin^2 \Delta\phi \quad (2)$$

の光パワーが得られる。

図3(c)に示すのは、方向性結合器形光変調器である。この場合、印加電界によって結合量が増減し、強度変調が行われる。なお、図3(b)(c)のものは、1×2光スイッチにもなる。

干渉計形と方向性結合器形にはそれぞれ特長があるが、最近、変調帯域幅数GHzまでの干渉計形光強度変調器が導波路形光位相変調器と共に、米国において商品化された。

5. 高速化の方策

導波形式とすることによって光変調器は高効率となり、(変調電力/帯域幅)の値はバルク形式のものに比べて3桁程度改善された。しかし、図2に示したように、普通の導波路形光変調器においては変調電極が一種のコンデンサとなり、その電気容量によって周波数帯域幅がかなり制限される。初期の導波路形光変調器の帯域幅は、数100MHz程度に過ぎなかった。光波の結晶走行時間によっても変調周波数帯域は制限されるが、たいいていの場合、電気容量によるものの方が優勢である。

進行波動作

電気容量による制限は、図3に示すように、変調電極を一種の伝送路とすることによって解決できる。これを進行波動作と呼んでいる。この場合、変調波も光波も同じ方向へ伝搬するので、速度整合（変調波と光波の速度を一致させること）が成立つ限り、光走行時間の問題も解決される。

しかし、導波路形の場合には、構造上、完全な速度整合をとることは困難であり、走行時間差の影響を除くことはできない。速度を屈折率で表すことにし、光波と変調波に対する等価屈折率を、それぞれ、 n_0 および n_m とすると、速度非整合（屈折率非整合ともいう）による変調帯域幅は

$$1.4c / (\pi |n_0 - n_m| L) \quad (3)$$

となることが示される。ここで、 c は真空中の光速である。LiNbO₃の場合、集中形動作に際しての電気容量による帯域幅は2.3GHz·cmであるのに対し、式(3)の値は、6.7GHz·cmであり、進行波動作の方が約3倍有利であることが分かる。現在、数GHz程度以上の帯域幅を持つ変調器はほとんど進行波形式を用いるようになっている。

非対称電極構造

変調電極用の伝送線路としては、図2に示した対称平面ストリップ線路を考えるのが自然である。しかし、数GHz以上の帯域幅を持つ変調器の場合には、給電および終端用同軸線路との接続点における反射および放射のため滑らかな周波数特性が得られなくなる。

このような問題は、図4のように、ストリップ線路を非対称にし、広い方の電極を接地電極とすることによって解決される。その際、線路の特性インピーダンスは、電極幅 w と間隔 s の比で決まり、同軸線路に整合させることができる。

高速変調素子の構成

以上のような考えで設計、試作した導波路形光位相変調器によって、初めて10GHz以上の変調

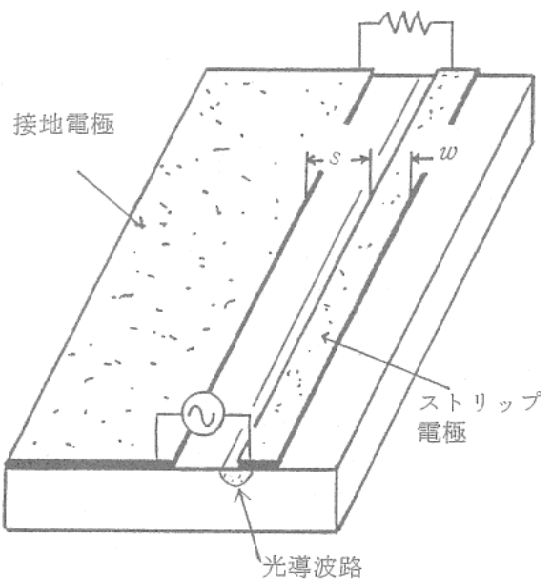


図4 非対称変調電極を持つ進行波光変調器

周波数帯域にわたって、滑らかな変調特性が実現され、高速変調器の見通しが得られた。ここでは、同様の変調電極を用いたプッシュプル干渉計形光強度変調器の一例を図5に示す。基板としてはLiNbO₃カット基板を用い、Ti拡散によって導波路を形成している。波長633nmの光波に対しDCから18GHz程度まで有効な変調が行われている。3dB帯域幅11.2GHz、パルス応答時間43ps、(変調電力/帯域幅) $P/\Delta f$ 11.6mW/GHzである。帯域幅10GHz、応答時間50psを一つの到達点とすれば、初めてこれを達成した光変調器であるといえる。

進行波動作と非対称変調電極構造は、導波形

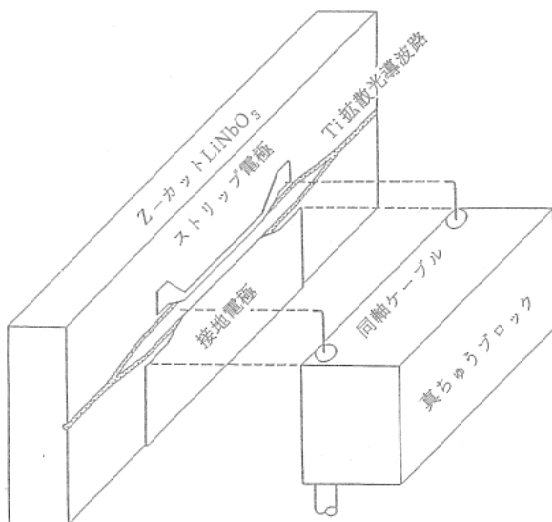


図5 高速光変調器の例

高速光変調素子を構成する際の一つの標準的な手法となっており、干渉計形だけでなく方向性結合器形にも適用されている。

高性能化

導波形光変調素子の進行波動作における一つの問題点は、光波と変調波の速度非整合である。図6に示す溝付き変調素子は、非整合の度合いを少なくする一つの試みで、変調電極間に溝を設けることによって変調波に対する等価屈折率を下げようとするものである。

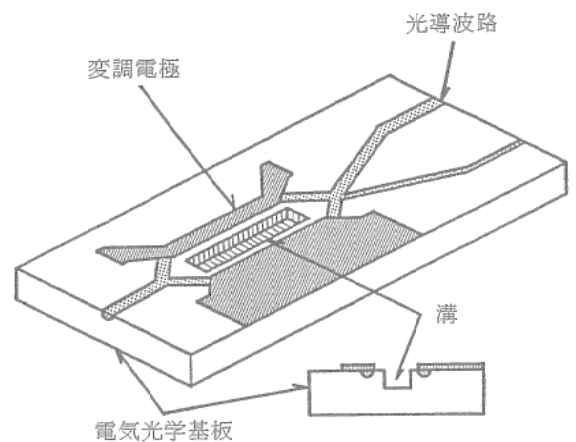


図6 溝付き高速光変調器

干渉計形強度変調器のもう一つの問題点は、2本の導波路間の結合を避けるためには導波路間隔を広くとらねばならず、したがって電極間隔を狭くできないことである。図6の構造は、速度非整合を小さくするだけでなく、導波路間の相互作用なしに電極間隔を狭くできるという利点を持っており、駆動電圧を下げるができる。

試作した素子では、電極間隔を10μmとし、その間に幅6μm、深さ4.3μm、長さ6mmの溝が形成されている。波長633nmの光波に対する変調実験を行い、3dB帯域幅12GHz、 $P/\Delta f=1.5\text{mW/GHz}$ の結果がえられた。溝の効果によってこれまでになく高能率の変調器が実現されたことになる。

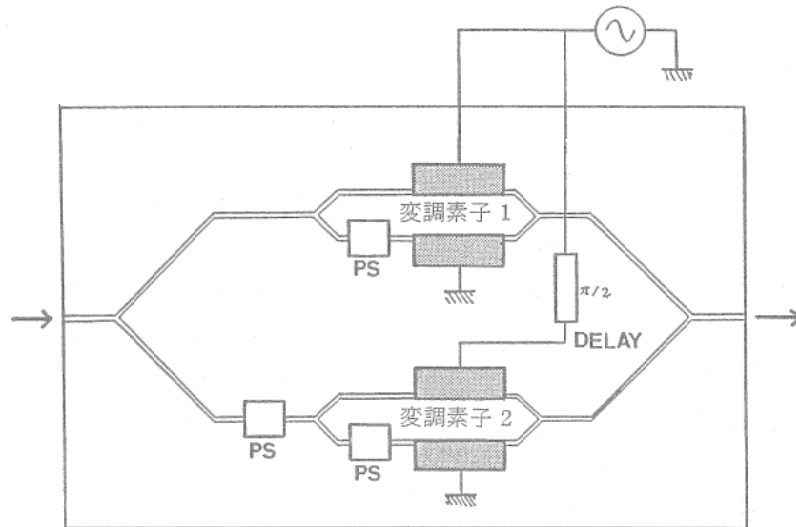
6. 集積化

光変調素子/スイッチの集積化も進み、16個の方向性結合器形スイッチを集積した4×4光

スイッチマトリックスはもちろん、最近では、集積個数64の8×8マトリックスも報告されている。しかし、これらは比較的低速の素子を集積したものであり、「高速」光変調素子を同一基板上に集積化して構成する回路には難点も多く、集積度もあまり上がっていないのが現状である。以下、二三の例を示す。

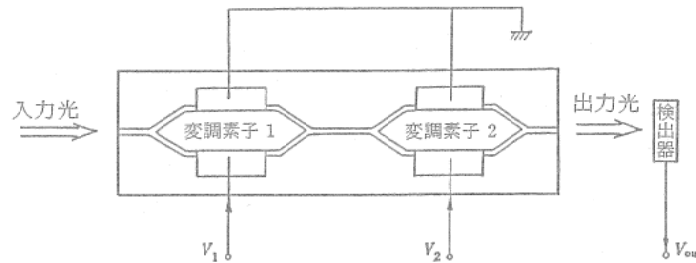
SSB変調/周波数変換回路

最初の例は、2個のプッシュプル干渉計形光変調素子を並列に集積し、さらに3個の光移相素子を加えたものである。図7(a)はその構成を示している。二つの変調信号に $\pi/2$ の位相差を与え、さらに光移相量を適当な値に調整す

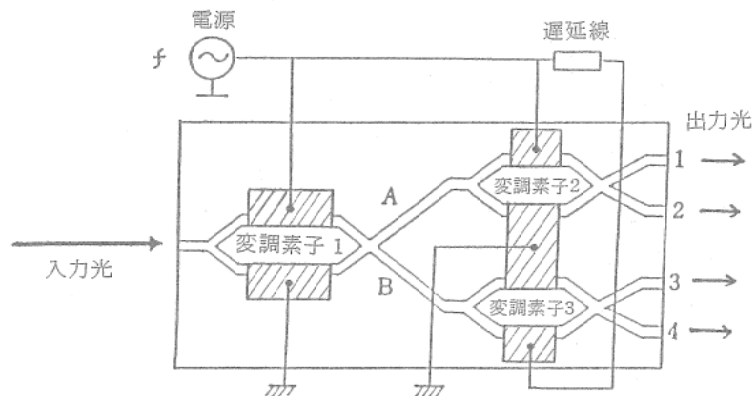


PS: 光移相素子

(a) SSB光変調素子



(b) 高速信号相関回路



(c) 1×4高速光スイッチ列とデマルチプレクサへの応用

図7 高速光変調素子の集積化

ると、SSB（単側波帯）光変調素子あるいは光周波数変換器として動作する。

変調周波数2GHzにおける実験の結果、SSB動作が確認されている。この場合、搬送波（入力光）スペクトルは抑圧されるので、出力光は、移相器の調整によって、上側帯波あるいは下側帯波のみにすることができる。したがって、入力光周波数を±2GHzだけ変化させたことになる。すなわち、光周波数変換器あるいは光周波数シフタと考えても良い。

信号相関光回路

次の例は、図7(b)のように2個の干渉計形変調素子を縦続接続したもので、光を媒体とした高速電気信号の掛け算回路である。試作回路では、変調素子#1を集中形（帯域幅3GHz）、#2を進行波形（帯域幅12GHz）としている。この回路によって、信号掛け算およびピコ秒領域における信号相関の実験が行われている。

後者の例では、2GHzおよび4GHzのCW電気信号と、幅50psのパルス電気信号の相関をとり、パルス信号に適当な遅延時間を与えることによって高速電気信号のサンプリング波形が得られている。

高速デマルチプレクサ回路

最後の例は、3個の高速変調素子を集積化したものである。この場合、図7(c)に示すように、各干渉計形変調素子の出力側には、Y分岐ではなく、ハイブリッド回路である非対称X分岐を用いており、一種の1×4高速光スイッチ列を形成している。

図のように、周波数 f の1個の電源を用い、変調素子の長さ、動作点、変調信号の位相差を適当に設定し、入力側導波路から繰り返し周波数 $4f$ の光パルス列を入射させる。すると、4個の出力導波路からは、繰り返し周波数 f で、それぞれ、位相が90度づつ異なる光パルス列がえられる。すなわち、4チャンネルの高速タイムデマルチプレクサが構成されたことになる。試作回路によって、 $f=1\text{GHz}$ における基礎動作が確かめられている。

7. 応用

高速光変調素子は、最近になって、素子単体として実際に応用されるようになった。半導体レーザーは、高速直接変調に種々の問題点があるので、高速長距離光伝送システムでは、レーザーは光源として安定に動作させ、外部変調器として、導波形光変調素子が用いられている。実際、Ti:LiNbO₃光強度変調器を利用して、4Gb/sの伝送速度で117km（および8Gb/sで69km）の長距離にわたる無中継伝送実験が行われている。また、長距離コヒーレント光伝送システムでは、Ti:LiNbO₃光位相変調器によって、2Gb/s 170kmの伝送実験が行われている。

また、InGaAsP/InP半導体レーザー発振器の共振器内部にTi:LiNbO₃光強度変調器を組込んで、モード同期により繰り返し周波数7.2GHzパルス幅22psの光パルス列を発生させたという報告もある。

8. むすび

導波技術の導入によって、光変調素子は大幅に高性能化され、10GHz以上の3dB帯域幅、50ps以下の応答時間を持つ素子を実現され、高速長距離光伝送システムの実験などに応用されている。しかし、光波が潜在的に持っている高速度性には到底及ばないのが現状であり、さらに高速化を図ることが望まれる。当面の目標としては、ミリ波帯における光変調が考えられる。

また、このような素子を複数個集積化することによって、高速の信号処理を行う光集積回路もいくつかえられている。しかし、現在のところ高速変調素子はかなり大型であり、集積度を増すのに難しい点がある。

参考文献

解説的文献だけを挙げる。光集積回路全般に関しては;

- 1) 西原, 春名, 栖原: 光集積回路, オーム社 (1985)
- 2) L.D. Hutcheson, Ed.: Integrated Optical Circuits and Components, Marcel Dekker, New York (1987)

高速導波形光変調器に関しては：

- 3) 光導波エレクトロニクス編集委員会編：光導波エレクトロニクス”，VI-2章，日本学術振興会（1981）
- 4) R.C. Alferness: “Waveguide Electrooptic Modulators” IEEE Trans. MTT, MTT-30, p.1121 (1982)
- 5) T. Sueta and M. Izutsu: “High-Speed Guided-Wave Optical Modulators”, Optical Devices and Fibers 1982, ed. Y. Suematsu, Ohm Sha, p.140 (1982)
- 6) 末田，井筒：高速光変調素子とその集積化，オプトロニクス，No.64, p.70 (1987.4)

