

氏名	三浦和則
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和62年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	広帯域光変調器に関する研究
指導教官	東北大学教授 川上彰二郎
論文審査委員	東北大学教授 川上彰二郎 東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 山之内和彦 東北大学助教授 皆方 誠

## 論文内容要旨

### 第1章 緒 論

光変調器は、大容量光ファイバ通信システムあるいは光情報処理システムにおいて重要な能動素子である。現在までに、ニオブ酸リチウムを用いた進行波形光変調器により広帯域化の研究が数多くなされている。変調帯域幅は主に光波と変調波との速度非整合によって制限をうける。ニオブ酸リチウムを用いたプレーナ形光変調器では、光波と変調波の実効屈折率はそれぞれ2.2と4.2であり、光波の位相速度は変調波の位相速度の約1.9倍である。現在までに、進行波形光変調器の速度非整合を改善する方法としていくつかの提案がなされており、光波と変調波との位相速度の比は約1.7まで改善されている。しかし、速度非整合を改善するに伴って光導波路に作用する印加電界が弱くなり能率が低下することと、特性インピーダンスが小さくなり給電系に整合がとれないという問題点があった。

本論文では、図1に示す完全に速度整合がとれかつ高効率な進行波形光変調器の新しい構造を提案している。この構造の特長は、大幅に速度非整合を改

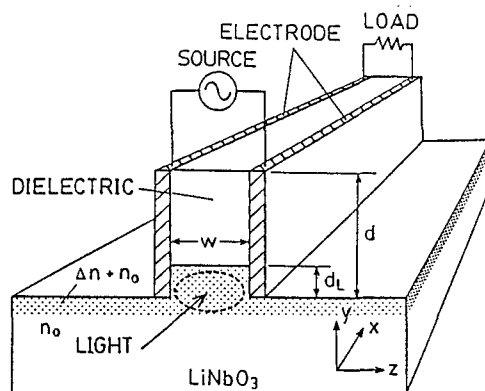


図1 光変調器の概略図

善することができ、速度整合を行なうことによって光導波路に作用する電界強度は低下しないことにある。リッジの上部の低屈折率の物質として石英ガラス、空気を用いた場合について変調帯域幅、特性インピーダンス、および印加電界の補正係数について計算を行ない、提案した広帯域光変調器の具体的な特性を示している。更に、変調帯域幅に及ぼす電極損失の影響を検討している。実験的な検証としては、リッジの上部に石英ガラスを用いた場合について試作し、定在波法と時間領域反射法により変調波の実効屈折率の測定と基礎的な変調実験を行ない、提案した光変調器が高効率・広帯域であることを確認している。

## 第2章 理論計算

リッジ上部の低屈折率物質を、石英ガラスとした場合 (Type 1) と、空気とした場合 (Type 2) について変調帯域幅  $f_m$ 、特性インピーダンス  $Z_0$ 、印加電界の補正係数  $\Gamma$  を計算した結果を図2と図3に示す。ここで、 $l$  は電極長であり、変調波は無損失であると仮定して変調帯域幅の導出を行っている。得られた結果を次にまとめる。

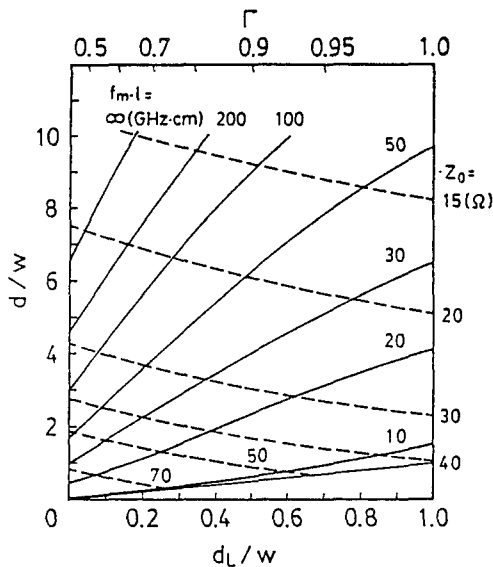


図2 計算結果 (Type 1)

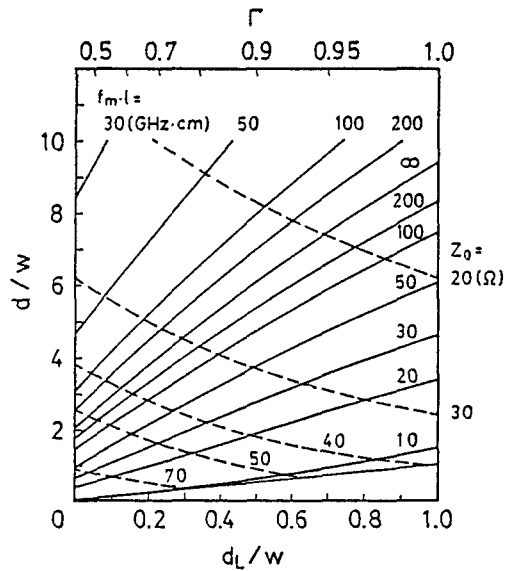


図3 計算結果 (Type 2)

A. Type 1 完全に速度整合がとれるのは  $Z_0$  が  $22\Omega$  以下、 $Z_0$  が  $50\Omega$  となるのは  $f_m l$  が  $90$  (GHz cm) 以下のときであり、完全に速度整合がとれかつ  $Z_0$  が  $50\Omega$  となるところは存在しないことを示している。 $\Gamma$  の値は  $0.5 \sim 1$  でありプレーナ形の  $0.2 \sim 0.4$  に比べて大きな値を示している。

B. Type 2 完全に速度整合がとれるのは  $Z_0$  が  $55\Omega$  以下であり、 $d/w = 2.5$ 、 $d_L/w = 0.04$  のときに完全に速度整合がとれ、かつ  $Z_0$  が  $50\Omega$  となる。そのときの  $\Gamma$  の値は  $0.5$  である。

速度整合がとれている場合、電極の表皮効果による変調波の損失が問題となる。図4は、完全に速度整合がとれ  $Z_0$  が  $50\Omega$  となる理想的な構造 (Type 2) において、 $w = 4 \sim 8 \mu\text{m}$  とした場合の電

極長に対する変調帯域幅を求めた結果である。そのときの100%変調に必要な駆動電力は100~400mW(光の波長1.3 $\mu\text{m}$ , 電極長1cm)である。ここで, 電極材料としては, Cuを仮定している。この結果より, 電極による変調波の損失によって変調帯域幅は数THz程度に制限されることがわかる。

### 第3章 製作

提案した広帯域光変調器においてType2の構造は高効率・広帯域光変調器として理想的である。しかし, 現在の製作技術では困難な面が多いためType1の場合についての製作を行なっている。光変調器の加工プロセスは図5に示すとおりである。電極材料としてCuを用いており, ECRエッチング装置を用いて製作した。直流抵抗は厚さ3 $\mu\text{m}$ で5 $\Omega$ (電極長4.8mm)であった。図6に製作したリッジ形光導波路のSEM写真を示す。ほぼ目標どりのものを製作することができた。

### 第4章 実験

#### 4.1 実効屈折率の測定

A. 定在波法 末端を短絡した試料に変調信号(5~7GHz)を給電し, 線路上に沿ってプローブを動かすことによって定在波分布を測定した。この定在波分布より, 変調波の実効屈折率は約2.9の値が得られており, 理論値3.0と良く一致している。

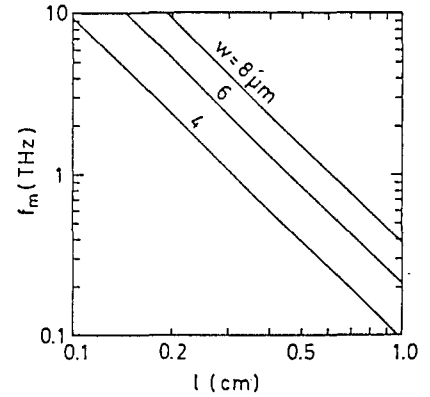


図4 電極長と変調帯域幅の関係

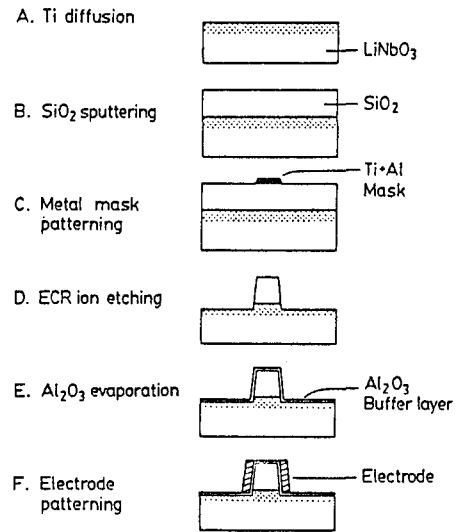


図5 加工プロセス

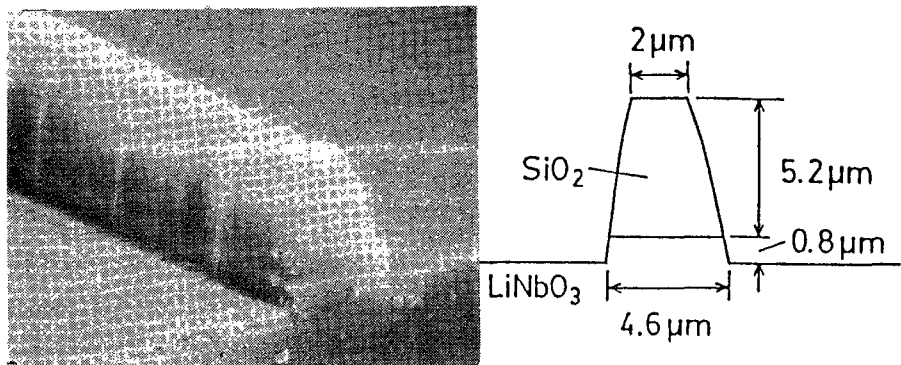


図6 光導波路のSEM写真

B. 時間領域反射計法 この測定より、プレーナ電極の領域では、変調波の実効屈折率は 4.2 が得られ、理論値と良く一致している。平行平板電極の領域では、2.8 であり、理論値 3.0 より小さな値が得られた。

#### 4.2 変調特性の測定

A. 低周波特性 電気光学定数  $r_e$  を用いた強度変調により測定を行なった。光源には波長 633 nm の He-Ne レーザ光を用いた。その結果、半波長電圧は 2.5 V が得られた。この値より印加電界の補正係数は 0.7 と推定され、理論値と良く一致している。光波に対する挿入損失は TM 波で 3 dB、TE 波で 10 dB であった。

B. 高周波特性 電気光学定数  $r_{33}$  を用いた位相変調により測定を行ない、変調したときの光変調器からの出射光の side band を観測した。変調波は、10 MHz ~ 20 GHz の信号発生器により給電した。この方法によって、20 GHz までの変調は確認されている。しかし、電極による損失が大きいため変調効率はかなり低下している。

### 第 5 章 討 論

図 7 は、無損失、 $\alpha_0 = 0.32$  (損失の理論値) のときの周波数特性の理論曲線と実験値を  $\circ$  印で示したものである。実験値は理論曲線と一致しない。これは、電極の表皮効果による損失の他に給電点での損失や電極からの放射損失が大きいことを示している。変調波及び光波の損失が大きい原因として、金属マスクの幅が一様でないことと堆積した石英ガラスの表面や内部が均一でないことが考えられ、リッジの加工精度を上げることによって改善できると思われる。

### 第 6 章 結 論

本論文では、完全に速度整合がとれ、かつ高能率な進行波形光変調器の新しい構造を提案した。次に、理論計算により、提案した広帯域光変調器は完全に速度整合がとれ、かつ高能率であることを示した。更に、電極の表皮効果による変調波の損失を考慮した場合について変調帯域幅を求めた結果、理想的な構造において変調帯域幅は数 THz 程度に制限されることを述べた。最後に、理論計算より得られた結果を検証するために、提案した広帯域光変調器を製作し、変調波に対する実効屈折率の測定と基礎的な変調実験を行なった結果、変調波の実効屈折率 3.0 (変調帯域幅に換算すると 36 GHz)、印加電界の補正係数 0.7 であり、理論値と良く一致した結果が得られた。

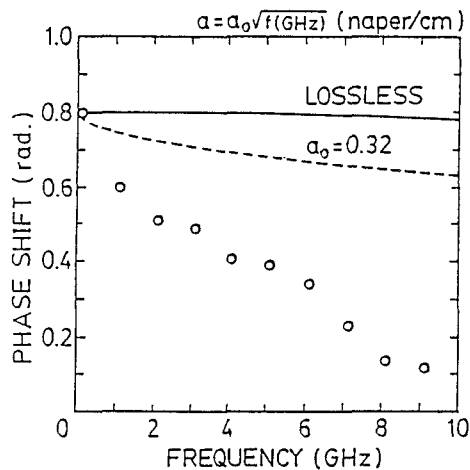


図 7 周波数特性の理論値と実験値

## 審査結果の要旨

現在広く実用に供されている光通信方式では、変調信号の周波数は高々 2 GHz の程度に限られている。その主な原因は広帯域光変調の困難さであり、より具体的には、最も重要な電気光学材料である LiNbO<sub>3</sub> 結晶内を走行する光波と変調信号波の速度不整合に基づく帯域制限である。導波路型変調器において、変調信号波の位相速度を導波光の速度に近づけるための提案・実験は幾つかなされているが、特性上または実現性の上で十分ではなかった。著者は、立体構造の採用によりほぼ完全な速度整合を図り得ることを見出し、反応性イオンエッチング (RIE) 等によりその構造を実現し、実験を行った。本論文はその成果をまとめたもので全編 7 章よりなる。

第 1 章は緒論である。第 2 章では高能率・広帯域光変調器実現のための諸条件を論じ、それを満たすものとして LiNbO<sub>3</sub> 光導波路の上部に誘電体 (SiO<sub>2</sub> など) 部を導波路幅の数倍の高さ、導波路と同じ幅で設け、誘電体・LiNbO<sub>3</sub> 一体のリッジの両側面に変調信号用電極を設ける変調器構造を提案している。

第 3 章では変調信号波の電力の一部が低誘電率部 (SiO<sub>2</sub> または空気層) に拡がることにより位相速度が増大する効果を解析し、パラメータの最適化により速度整合・インピーダンス整合を同時に達成し得ることを見いだしている。この完全速度整合条件下における帯域幅の上限は、電極の表皮効果で制限され、1 THz 程度となることを明らかにしている。これらは重要な成果である。

第 4 章では電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 型 RIE による LiNbO<sub>3</sub> および SiO<sub>2</sub> の微細加工、Cr/Cu 電極の作製など、広帯域変調器の製作方法を明らかにしている。これは実用上有意義な知見である。

第 5 章では試作した変調器の位相速度および変調特性の測定を、第 6 章では実験結果に関する考察を述べている。変調波の位相速度を二つの方法で測定し、実効屈折率 2.9~3.0 という結果を得たが、これは解析による値 3.0 (帯域幅 36 GHz) とよく一致している。変調波の伝送特性を測定し、帯域幅の制約要因は速度不整合から電極の表皮効果による損失に移ることを明らかにしている。より速度整合に近づけるためには、より高い垂直壁をもつリッジの加工が必要であること、変調波の損失を小さくするにはリッジ側壁の平滑化が必要であることを論じている。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、速度整合した導波路型 LiNbO<sub>3</sub> 光変調器を提案し、設計および加工の方法を明らかにしたもので、光通信工学・光電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。