

超伝導電極を用いた進行波形LiNbO₃光変調器の開発 I.

吉田, 啓二
九州大学大学院システム情報科学研究院電子デバイス工学専攻

南, 昭宏
九州大学大学院システム情報科学研究院電子デバイス工学専攻 : 修士課程

神田, 豊
福岡工業大学電子工学科

<https://doi.org/10.15017/1474989>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 1, pp.129-132, 1996-09-27. 九州大学大学院システム情報科学研究院
バージョン :
権利関係 :

超伝導電極を用いた進行波形 LiNbO₃光変調器の開発 I.

吉田 啓 二* ・ 南 昭宏** ・ 神田 豊***

Development of a Traveling-Wave Type LiNbO₃ Optical Modulator with Superconducting Electrodes I.

Keiji YOSHIDA, Akihiro MINAMI and Yutaka KANDA

(Received June 24, 1996)

Abstract: Microwave characteristics of a LiNbO₃ optical modulator employing superconductor electrodes (Nb) as a transmission line of a traveling signal has been studied experimentally in the temperature range from 300K to 4.2K. In the frequency range between dc and 26.5GHz it is shown that the obtained modulation depth is in good agreement with the theoretically expected one. The present results demonstrate the possible applications of superconducting electrodes to high performance LiNbO₃ optical modulators.

Keywords: LiNbO₃, Traveling-wave type optical modulator, Superconducting electrodes, Microwave modulation

1. はじめに

誘電体結晶であるLiNbO₃の電気光学効果を用いた光変調器^{1),2),3)}はチャージングのない高速光変調器として期待され、半導体レーザの直接変調に代わる外部変調器として幹線の大容量光通信システム(10Gbit/sec)への実用化が既になされている。本デバイスでは更に周波数帯域の拡大や駆動電圧の低減を目指した研究が活発に行われている。

LiNbO₃を用いた光変調器の中で最も高性能が期待されている進行波信号電極を用いた変調器(進行波形光変調器)の性能を制限する要因として、1)光波と信号波の位相速度の違い(速度不整合)、2)信号電極の伝搬損失が挙げられる。このうち、1)については電極形状の工夫²⁾、バッファ層やシールド板³⁾の添加によって解決できる。2)に対して筆者らは、低損失・低分散の特長を有する超伝導電極の導入により、進行波形 LiNbO₃光変調器の性能が大幅に向上出来ることを理論的に予測し⁴⁾、低周波での予備実験^{5),6)}を行ってきた。本研究では、超伝導電極(Nb)を用いたLiNbO₃光変調器のマイクロ波特性(dc~26.5GHz)の測定を行い、理論の実証を行った。

2. 進行波形光変調器の予測性能

Fig.1に示すような長さLの実効長を有し、間隔sのコプレーナ電極を持つMach-Zehnder形進行波光変調器に、進行波電圧

$$V(z, t) = V_m e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad (1)$$

および直流電圧 V_{dc} を印加したとき、出力端における光の位相差 $\Delta\phi$ は次式で表される⁷⁾。

$$\Delta\phi = \pi \frac{V_{dc}}{V_\pi} + \pi \frac{V_m}{V_\pi} F(f) \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

ただし、

$$F(f) = \left[\frac{1 - 2e^{-\alpha L} \cos\theta + e^{-2\alpha L}}{(\alpha L)^2 + (\theta)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\alpha L + e^{-\alpha L} (\theta \sin\theta - \alpha L \cos\theta)}{\theta - e^{-\alpha L} (\theta \cos\theta + \alpha L \sin\theta)} \right]$$

$$\theta = \frac{\omega L (N_m - N_o)}{c}$$

となる。ここで、 V_m ;電圧振幅、 α ;伝送線の減衰定数、 $\omega = 2\pi f$;変調角周波数、 β ;位相定数、 $V_\pi = \lambda s / 2\gamma_{33} N_o^3 \Gamma L$;半波長電圧、 λ ;光の波長、 Γ ;印加電圧低減係数、 s ;電極のギャップ間隔、 L ;電極の長さ、 c ;光の速さ、 θ ;出力端における信号波と光波の電気長差、 $N_m = c/(\omega/\beta)$;信号波の等価屈折率、 N_o ;光波の屈折率である。

このとき、Mach-Zehnder形光変調器の出力光強度Iは、次式で与えられる。

平成8年6月24日受付

* 電子デバイス工学専攻

** 電子デバイス工学専攻修士課程

*** 福岡工業大学電子工学科

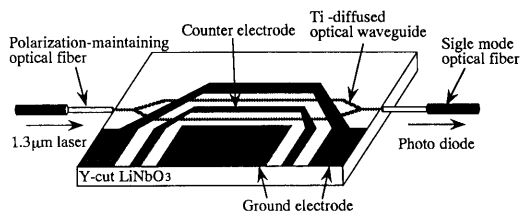


Fig.1 Schematic of a traveling-wave type optical modulator with y-cut LiNbO₃

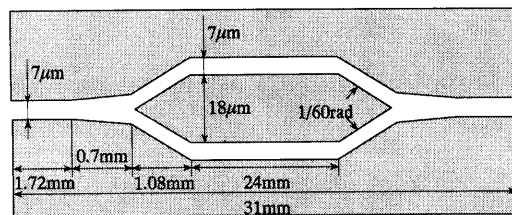


Fig.2 Pattern of an optical waveguide

$$I = I_0 \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \quad (3)$$

ただし、 I_0 は $\Delta\phi = 0$ 、即ち変調がない場合の最大光強度である。(2)式の $F(f)$ は、交流変調に対する位相変化量の振幅を表しており、規格化変調度として定義されるものである。これは、電気長差 θ や減衰定数 α の周波数依存性を介して周波数特性を示し、変調器の周波数帯域、変調電力を決定する重要なパラメータである。本研究では、超伝導電極を用いた光変調器を製作し、 $F(f)$ の実験と理論の比較を行った。

3. 実験

3.1 光変調器の製作および実装

今回製作した光変調器は、Fig.1に示すような Mach-Zehnder 形光強度変調器であり、電極の形状は、コプレーナウェーブガイドである。基板には、y-cut LiNbO₃を用いた。

光導波路は、基板上にTiを約600[Å]成膜し、Fig.2に示すようなパターンを形成した後に、基板中に熱拡散することによって作製した。

電極には、Nbを約5000[Å]成膜して、Fig.3に示すようなパターンを基板上に作製した。

本実験において、電極に用いる超伝導体としてNbを用いているため、製作した素子全体は極低温状態にする必要があり、そのため、液体Heを用いる。そこで、信号波系の回路および光波系の回路、とくに後者側には十分に注意を払う必要がある。

製作した基板の光導波路と入出力に用いる光ファイバの接続には、端面直接接続法を用いた。はじめに、ガラス毛細管に光ファイバを通し、両者間のわずかな隙間に紫外線硬化樹脂を少量流し込む。それから、光ファイバの先端を基板側の光導波路に接触させる。入力側は、y-cut LiNbO₃光変調器の動作のためTEモードの光を偏波面保持ファイバで入力する。つぎに、あらかじめ通しておいたガラス毛細管も基板に接触させ、紫外線硬化樹

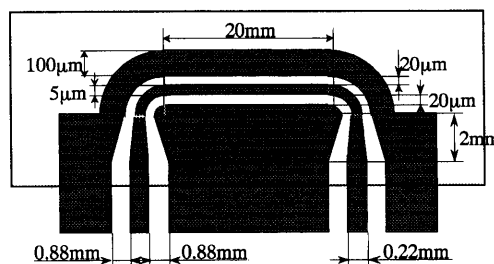


Fig.3 Pattern of a superconducting coplanar waveguide electrode

脂を固化して仮留めを行う。そのあとで、接続部分全体を紫外線硬化樹脂で覆い、その部分を固化させ、完全にファイバ及び基板を固定する。

最後に、実装したホルダーを実験用のモジュールに固定し、それを液体Heの入ったデュアの上部にセットして、モジュール全体を徐々に下げていき、それと共に光変調器の温度を徐々に低下させることによって、実験を行った。

3.2 計測法

Fig.4に変調実験を行う際の実験システムのブロック図を示す。光源には、波長1.3[μm]の半導体レーザを用いた。マイクロ波信号は、0~26.5GHzの掃引発振器を用いた。

直流変調実験では、直流バイアス電圧を +15 [V] から -15 [V] の範囲で緩やかに変動させながら、出力側の光パワーの変動を記録した。

マイクロ波変調実験は、包絡線検波法⁷⁾を用いた。即ち、マイクロ波を、光パワーメータの対応できる低周波数 (30Hz) で振幅変調し、その信号を光変調器の電極に加え、変調された光出力の変動をロックインアンプで同期検波する。

以下に、本方法による変調度の導出法を説明する。

(3)式に(2)式を代入し、交流項は、光パワーメータが検出できないので省略し、直流項のみを残すと、

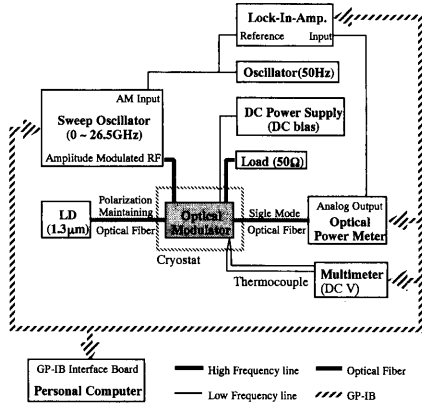


Fig.4 Block diagram of the measurement system

$$I = \frac{I_o}{2} \left\{ 1 + \cos \Delta\Phi_0 - \frac{\cos \Delta\Phi_0}{4} (\Delta\Phi_m)^2 \right\} \quad (4)$$

となる。ただし、 $\Delta\Phi_0 = \pi \frac{V_{dc}}{V_\pi}$ 、 $\Delta\Phi_m = \pi \frac{V_m}{V_\pi} F(f)$ であり、小振幅動作 $\Delta\Phi_m \ll 1$ を用いた。また、マイクロ波がonのときの光出力と、マイクロ波がoff、すなわち $V_m = 0$ のときの光出力との差 ΔI をロックインアンプで検出すると、

$$\Delta I = \frac{I_o Z}{4} \pi^2 \cos(\Delta\Phi_0) \left(\frac{F(f)}{V_\pi} \right)^2 P_{in} \quad (5)$$

$$P_{in} = \frac{V_{in}^2}{2Z} \quad (6)$$

が得られる。ここで、 P_{in} ；マイクロ波の入射電力、 $Z = 50\Omega$ ；電極の特性インピーダンスである。光出力は極値になるようにDCバイアス電圧を固定するので $\cos(\Delta\Phi_0) = 1$ とおける。これらを考慮して(5)式を整理すると、次式ようになる。

$$F(f) = \sqrt{\frac{4\Delta I V_\pi^2}{Z I_o \pi^2 P_{in}}} \quad (7)$$

P_{in} 、 I_o 、 V_π 、 ΔI の実験データと上式を用いて、変調度を評価することができる。

4. 実験結果

4.1 直流変調特性

4.2Kにおける、直流変調実験結果をFig.5に示す。(4)式で $\Delta\Phi_m = 0$ の場合に予想される V_π 周期の変調特性が、

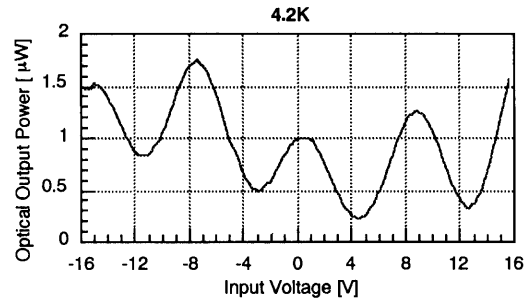
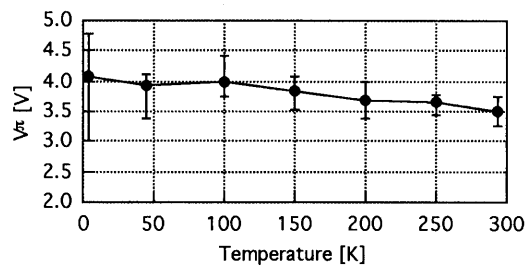


Fig.5 DC modulation characteristics

Fig.6 Temperature dependence of half-wave voltage V_π

極低温になっても観測されることが示された。背景光の増大、周期の乱れは、冷却による光ファイバの熱膨張と紫外線硬化樹脂の熱収縮から生じる、光ファイバのズレによるものと考えられる。つぎに、温度変化に対する半波長電圧 V_π の特性をFig.6に示す。この結果では、温度の低下に伴って V_π の増加傾向が見られるが、これはLiNbO₃の電気光学定数 γ_{33} や光波に対する等価屈折率 N_0 の温度変化と考えられる。また、今回はこれまでの研究で用いた基板よりも長いものを用いているので、そのときに比べて V_π が減少していることも確認できた。

4.2 変調電極の伝送特性

極低温にしたときの変調電極の伝送パラメータ S_{21} をベクトルネットワークアナライザ(HP-8722c)を用いて測定した。その結果をFig.7に示す。 $-20\log_{10}|S_{21}| = 8.686L\alpha$ [dB]より伝送線の減衰定数を評価した。伝送線の減衰定数は電極損と誘電損からなるとし、超伝導電極の表面抵抗が f^2 に比例することを考慮して次式の減衰定数を仮定する。

$$\alpha = \alpha_{co}f^2 + \alpha_{dof} \quad (8)$$

ただし、右辺第2項はLiNbO₃基板の誘電損を表し、誘電正接 $\tan\delta = 0.005^8$)を仮定して $\alpha_{do} = 1.7 \times 10^{-2}$ [dB/cm·GHz]を用いた。上式の α_{co} をフィッティングパラメータとして電極損を評価した。

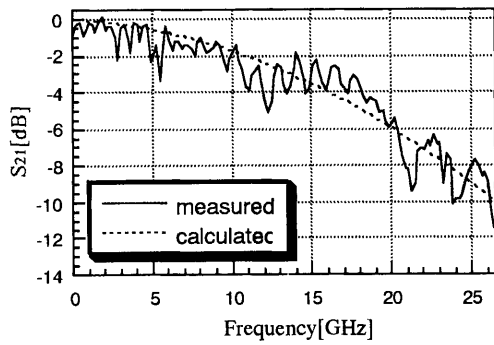


Fig.7 Transmission characteristics of Nb electrode

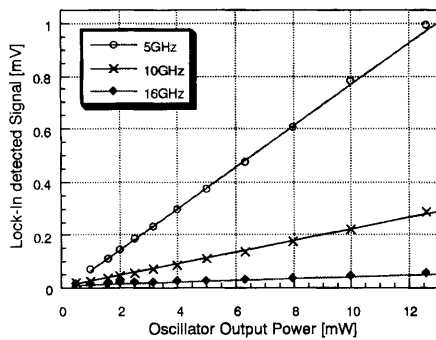


Fig.8 Signal voltage as a function of input microwave power

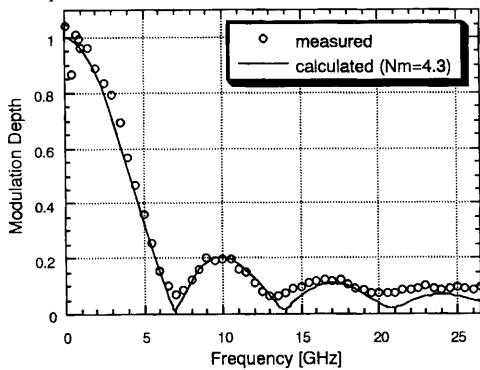


Fig.9 Frequency characteristics of modulation depth

Fig.7で点線はフィッティングさせたグラフで、そのとき推定した導体損は $\alpha_{co} = 4.3 \times 10^{-3} [\text{dB} / \text{cm}(\text{GHz})^2]$ であった。この値は、マイクロ波帯において常伝導電極の場合よりも数桁小さな値である。伝達特性にリップルが見られるのは、Kコネクタと変調電極との接続部分における、インピーダンス不整合によるものと考えられる。

4.3 マイクロ波変調特性

まず、(5)式の妥当性を確かめるためにマイクロ波（変調電極の信号波）パワー P_{in} に対するロックインアンプ出力特性を調べた。その結果をFig.8に示す。このグラフから、 ΔI と P_{in} の間に比例関係が得られるので、本実験にお

いて用いた包絡線検波法による評価式(5)は、妥当だと考えられる。

つぎに、変調度の周波数特性 $F(f)$ をFig.9に示す。このデータは、ロックインアンプ出力の周波数特性を測定し、(7)式に各パラメータを代入して求められたものである。実線は、(2)式に(8)式より実験で得られた減衰定数を用いて計算された理論曲線である。実験と理論の良い一致が得られた。理論で予測される、光波とマイクロ波の速度不整合に伴う周期構造が、明らかに観測されている。このような周波数特性は、電極の損失が十分に小さいときに初めて観測されるものであり、超伝導電極の低損失性を反映している。また、理論と実験の良い一致は、本実験のモデル(1)、(2)式および計測法の妥当性を示すものである。本実験により、超伝導電極を用いたLiNbO₃光変調器が予想通りに動作することが確認できた。

5. ま と め

進行波形LiNbO₃光変調器の変調電極部分に超伝導体(Nb)を用いた実験を行い、理論的に予測される変調特性を実証した。測定された超伝導電極の減衰定数は、常伝導電極に比べて十分小さいものであり、その結果得られた変調特性はほぼ無損失の場合の周期構造であった。本実験により、超伝導電極の導入によって予測されるLiNbO₃光変調器の性能向上の可能性が実証できたと考えられる。今回の実験では、変調度の周波数帯域は光波とマイクロ波の速度不整合によって決まっているが、シールド板を用いた速度整合³⁾により広帯域化が可能である。これについては次報 (II) で報告したい。

参 考 文 献

- 1) G.K.Gopalakrishnan , C.H.Bulmer , W.K.Burns , R.W.McElhanon and A.S.Greenblatt : " Electron.Lett., Vol.28, pp.826-827 ", (1992).
- 2) K.Noguchi, H.Miyazawa and O.Mitomi: " Electron.Lett., Vol.12, pp.949-950", (1994).
- 3) K.Kawano , T.Kitoh , H.Jumonji, T.Nozawa , M.Yanagibashi and T.Suzuki : " IEEE Trans. Micro. Theo. Tech. , Vol.39, pp.1595-1601 ", (1991).
- 4) K.Yoshida, K.Ikeda, K.Saito and Y.Kanda: "IEEE Trans.Appl.Supercond., Vol.3,pp.2792-2795", (1993).
- 5) K.Yoshida, N.Horiguchi and Y.Kanda: "IEICE Trans.Electron., Vol.E76-C, pp.1287-1290", (1993).
- 6) K.Yoshida , A.Nomura and Y.Kanda : "IEICE Trans.Electron., Vol.E77-C, pp.1181-1184", (1994).
- 7) M.Izutsu , H.Haga and T.Sueta : " Trans.IEIC. , Vol.E-63 , pp.817-822 ", (1980).
- 8) Y.Zhou, M.Izutsu and T.Sueta: "J.Lightwave Technol., Vol.9, pp.750-753", (1991).