

スパッタ法で生成した Nb_2O_5 薄膜と その導波路型光変調器への応用 II

西脇 彰*, 高田 直人**, 佐竹 明喜***

Nb_2O_5 Thin Films Deposited by RF Sputtering and Their Applications to Waveguide-type Light Modulators II

Akira NISHIWAKI*, Naoto TAKADA**, and Akiyoshi SATAKE***

(Received May 31, 1990)

On the fabrication of light-guiding Nb_2O_5 thin films by a RF sputtering method, we replaced the conventional target electrode with a magnetron-type one. As a consequence, the deposition rate of Nb_2O_5 films became larger by an amount of about ten times more than that reported in the previous paper¹⁾. Optical propagation losses of the films could be also reduced to 2 dB/cm for the TE-Oth mode.

The coupling length of the waveguide-type light modulator reported in the same paper was reexamined. A numerical estimation showed that the length would be 36.3 mm for the TE-Oth mode with the applied voltage of 40 volts.

1. はじめに

筆者らは、能動的な光導波路型機能素子の開発を目ざして、強誘電体単結晶基板上に光導波路を形成し、光変調器に応用することを検討してきた¹⁾。タンタル酸リチウム、 LiTaO_3 （常光線について屈折率 2.176 を持つ）を基板とする場合、導波路材料として五酸化ニオブ、 Nb_2O_5 を選び、RF スパッタ法で薄膜生成を行い、膜堆積速度 6.5 Å/min、屈折率 2.23~2.26、導波光伝搬損失 7.6 dB/cm を得てきた。

しかし、堆積速度や導波光伝搬損失の値は、かなり不満足なものであり、その改善が望まれた。

本論文では、単純な従来通りの RF スパッタ法を、マ

グネトロン型 RF スパッタ法に改良することにより、堆積速度をおよそ 10 倍速くし、伝搬損失を 2.0 dB/cm まで減少することができたことを報告する。

さらに、こうして得られた改善された導波膜を応用した光変調器の変調特性を再検討した結果、前論文で得られている値より、変調能率がおよそ 3 倍よくなる見込みがたった。

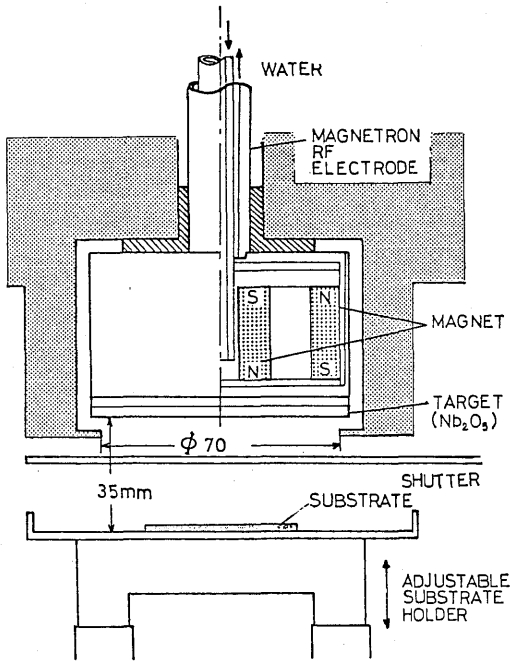
2. マグネトロン型 RF スパッタ法による Nb_2O_5 薄膜の生成²⁾

今回採用したマグネトロン型ターゲット電極の構造と、基板などの配置図を、第 1 図に示した。ターゲット電極をマグネトロン型にすると、放電ガス圧を低くすることができ、薄膜生成速度が改善される。さらに、得られた膜質がスパッタ放電による損傷を受けにくくなるこ

*電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

**岩村田高等学校 (Iwamura High School)

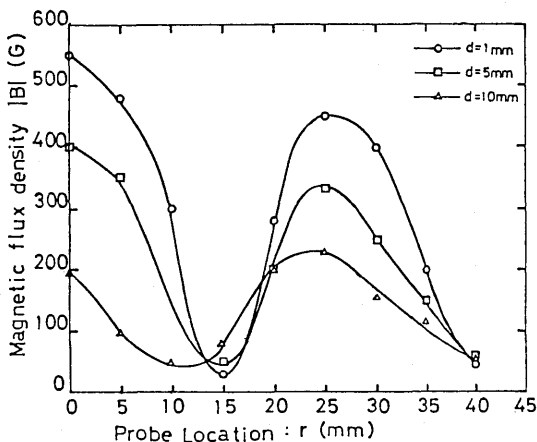
***柳大隈鉄工所 (Okuma Machinery Works Ltd.)



第1図 マグネトロン型電極配置図

とによって向上するといわれている³⁾。

筆者らの電極構造の特徴は、ターゲットと内部永久磁石のついた部分を、水冷パイプ部分と一体化せず分離し、後者を真空容器に外側から固定した後、前者を容器内部から下から挿し込んで装着できるようにした点である。こうすると、ターゲット材料の交換がかなりしやすくなるのである。ターゲット表面近傍での磁束密度の変化を測定したものが、第2図である。同図中、パラメータ d は、ターゲット (厚さ 5 mm) を装着する前の電極

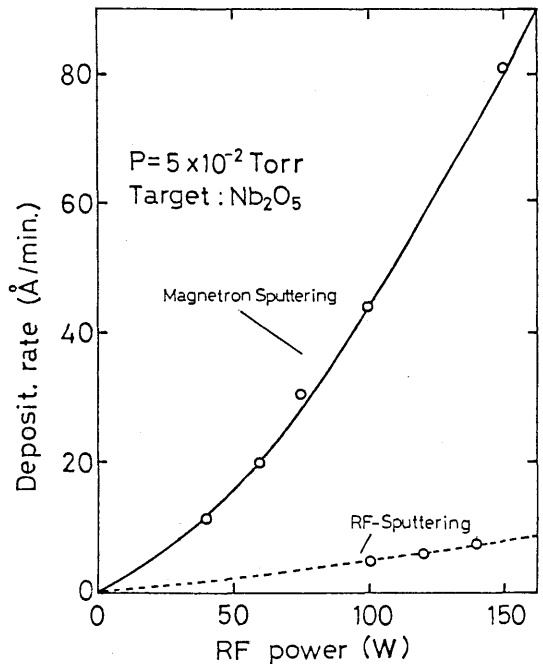


第2図 マグネトロン電極表面近傍での磁束密度変化

導体面からの距離であり、 r は円形電極中心からの距離である。ターゲット表面での磁束密度は、約 300 G であった。マグネトロン電極による放電の様子は、電極に誘起する電界と、それに直交する向きの磁界成分が有効に存在する領域で円環状に集中するものとなった。このため、ターゲット材のスパッタリングも、放電の強く集中する部分が顕著となり、その結果、得られる膜の膜厚分布均一性に対しては、悪影響をおよぼすこととなった。

Nb_2O_5 薄膜作製についての放電条件は、従来の RF スパッタ時¹⁾と殆んど同じであるが、電極間隔 35 mm での、安定最低放電ガス圧力が、従来型では約 4×10^{-2} Torr であったものが、改良マグネトロン型では約 2×10^{-3} Torr と低くなった。放電ガス圧は、低い方が、形成される膜の品質は高純度になると言われている³⁾。

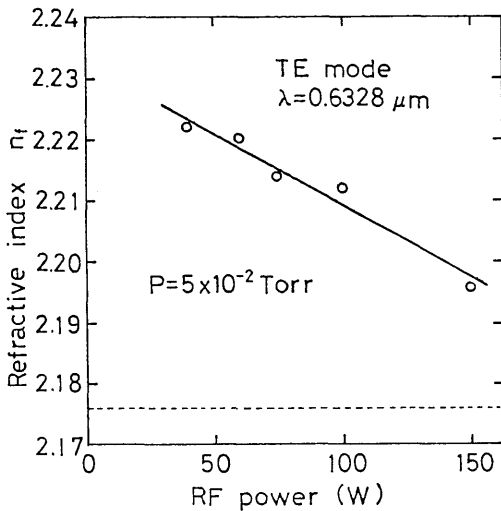
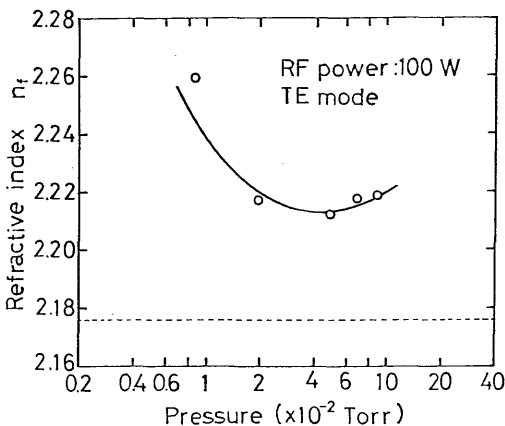
Nb_2O_5 薄膜の生成堆積速度は、マグネトロン型 RF スパッタリングでは、第3図のようになった。同図では、



第3図 マグネトロン型 RF スパッタで得られた膜堆積速度の RF 放電入力パワー依存性

比較のため、前報告の値もプロットした。ただし、RF スパッタの放電ガス圧は、 9.5×10^{-2} Torr である。RF 放電入力パワーを 140 W として両者の堆積速度を比較すると、およそ 10 倍 ($\sim 65 \text{ Å/min.}$: $\sim 6.5 \text{ Å/min.}$) 改善されることがわかった。

第4図は、得られた Nb_2O_5 薄膜の屈折率の、RF 放電パワー依存性を示すものである。第5図は、放電ガス圧


 第4図 Nb₂O₅薄膜屈折率のRF 放電パワー依存性

 第5図 Nb₂O₅薄膜屈折率の放電ガス圧依存性

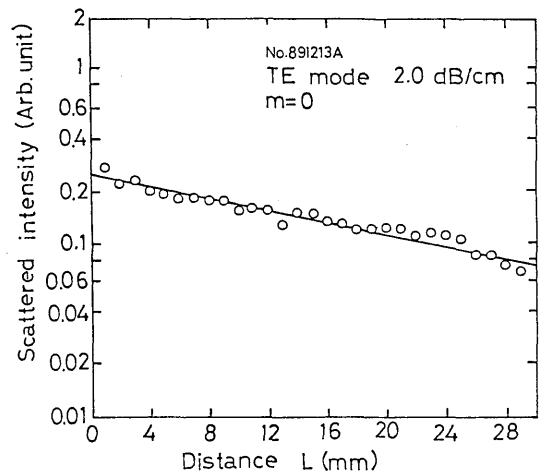
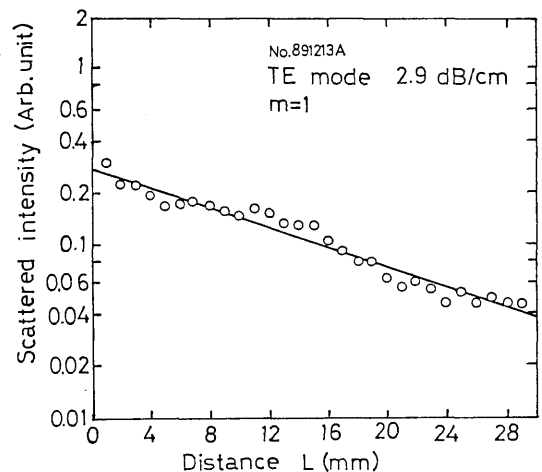
に対する膜の屈折率依存性を示すものである。なお、これらの膜の生成時には、基板を外部電源によって加熱することは行わず、放電やスパッタ粒子による発熱にまかせていた。この時、基板温度のモニターは、なされていなかった。

3. 生成された Nb₂O₅ 薄膜についての検討

Nb₂O₅薄膜の屈折率は、放電ガス圧や放電 RF 電力を適当に選ぶことによって、2.19~2.26 の範囲で制御可能なことがわかった。

屈折率 2.259 (基板はコーニング社 No.7059 スライドガラスで屈折率は 1.544) の薄膜について、He-Ne ガスレーザ 633 nm 発振光に対する導波光伝搬損失測定を行っ

た結果を第6図と第7図に示した。第6図は、TE 波の


 第6図 TE₀モードに対する伝搬損失

 第7図 TE₁モードに対する伝搬損失

$m=0$ 次の導波路モードに対するものであり、第7図は、同 $m=1$ 次モードについてのものである。2.0 dB/cm の損失は、放電ガス (Ar:O₂=8:2) 圧 9×10^{-3} Torr, RF 放電パワー 100 W, 無加熱, 約2時間のスパッタ条件で得られた膜についてのものである。この値は、前に RF スパッタで得た 7.6 dB/cm に比較すると格段の改善となっており、他で報告されているものに較べても遜色がない。 $m=1$ 次モードで損失が増加していることは、導波膜の上、下境界面での不均一性による散乱が寄与していると思われる。

本実験で不明確さを残した点は、マグネトロン型ターゲット電極としたためターゲットのスパッタが局所化さ

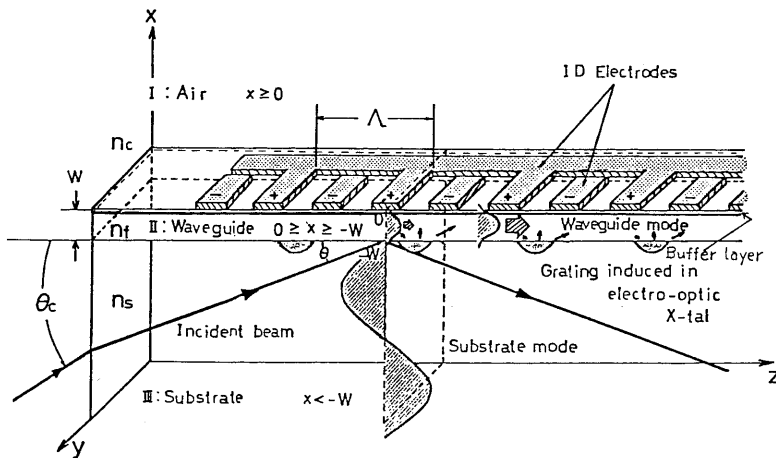
れ, 得られた膜厚が均一となる面積が制限されるということと, 基板加熱をせず, 基板温度のモニターを行わなかったために膜質に与える温度の影響が考察できないことである。前者については, m ライン法による導波路パラメータ (膜厚と屈折率) の測定⁵⁾の際の, m ラインのパターン変化を観察することによって見積ると, 厚さがほぼ一定と思われる面積は, ターゲット 76 mm ϕ , ターゲット基板間隔 35 mm の条件で得た膜で 20~25 mm ϕ 程度に限られるようであった。

4. モード変換型光変調器への応用と変調効率の検討²⁾

文献 1) で述べた導波路型光変調器の概念図は, 第 8 図のようである。ある角 θ で導波層で全反射する基板放

射モード光を, カバー側に着けた外部楕型表面電極に変調電圧を印加することにより強誘電体基板内に誘起する回折格子で散乱させ, 位相整合条件の成立する導波モード光を導波路内に励起するというものである。

これらの考察から, 変調器設計のパラメータを, $W = 0.23 \mu\text{m}$, $\Lambda = 50 \mu\text{m}$ と決め, あらためてモード結合係数を求めると, 変調電圧を V_0 として, $\kappa_{ab} = 1.08 \times V_0$ [m^{-1}] が得られた。基板放射モード光と導波モード光との間で完全にパワーの移行が行われる距離としての完全結合長 L_0 は, $L_0 = \pi / (2 \kappa_{ab})$ で与えられ⁵⁾, $V_0 = 40 \text{ V}$ とすると, $L_0 = 36.3 \text{ mm}$ となる。光変調器の寸法に対する要請から, 楕型電極の長さ L を, 20 mm とするとき

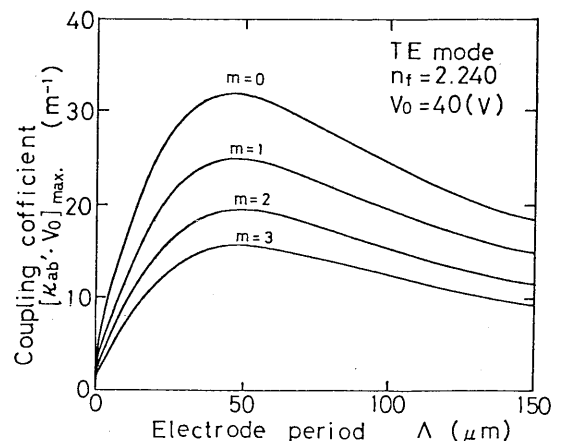


第 8 図 基板放射モード—導波路モード変換型光変調器の概念図

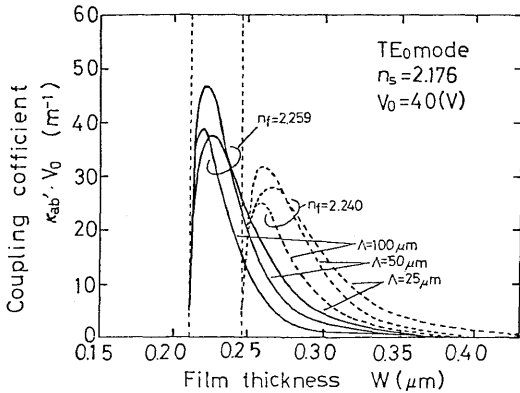
射モード光を, カバー側に着けた外部楕型表面電極に変調電圧を印加することにより強誘電体基板内に誘起する回折格子で散乱させ, 位相整合条件の成立する導波モード光を導波路内に励起するというものである。

前報告では, 変調に必要な電圧について, 変調器パラメータを変化させるなどの詳しい検討がなされていなかった。ここで再検討し, 変調効率を高めるには, どうするかを見ることにする。

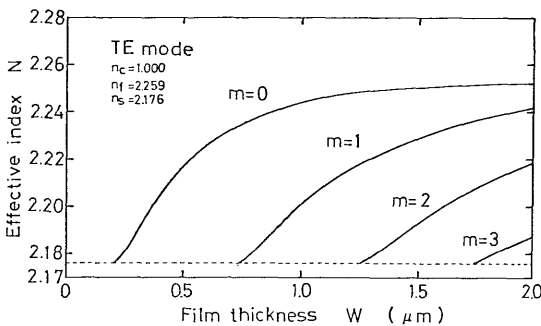
LiTaO₃を基板とした, TE 波 0 次モード励起, 動作波長 633 nm, 基板モードの全反射 (補) 角 3°, についての, 導波路の屈折率をパラメータとした楕型電極周期 Λ に対するモード結合係数 κ_{ab} ^{1), 5)} の変化を計算すると, 第 9 図のようになった。この図から, 製作がかなり容易と思



第 9 図 外部楕型表面電極の電極周期 Λ に対するモード結合係数 κ_{ab} の変化



第10図 導波層厚 W に対するモード結合係数 κ_{ab} の変化



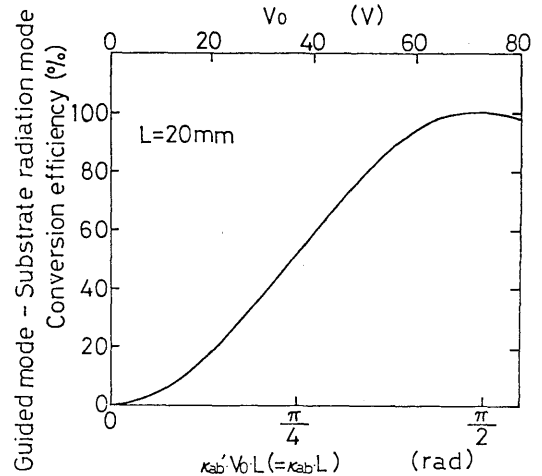
第11図 Nb₂O₅導波膜についてのモード分散曲線

は、変調電圧 40 V でモード変換効率 は約 58 % となる。
 $L=20$ mm とした場合の、変調電圧に対する変換効率の
 変化は、第 12 図のようになる。

5. おわりに

RF スパッタ法で、ターゲット電極をマグネトロン型
 に改良することにより、Nb₂O₅膜の生成堆積速度を、約
 10 倍改善し、導波光に対する伝搬損失も大幅に減ずるこ
 とができた。損失 2 dB/cm の膜は、光導波路として十分
 活用できるものである。

こうして得られた膜を導波層とした光変調器につい



第12図 電極長を 20 mm としたときの変調電圧に対
 するモード変換効率の変化

て、以前の報告を再検討した結果、パラメータをより適
 切に選ぶことによって、モード変換効率を、およそ 3 倍
 改善できる見込がついた。

本報告をまとめるにあたり、この研究に御援助いた
 だいた方々に感謝致します。

計算機使用上で、いろいろな便宜を図って下さいまし
 た本学の貴田桂介氏、太田健次氏、馬場清英氏に感謝致
 します。

1988 年度、1989 年度の電子工学科レーザ応用計測卒
 業研究の学生諸君に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 西脇彰, 佐竹明喜, 高田直人: 中部大学工学部紀要, **24**, 59, 1988.
- 2) 佐竹明喜: 中部大学工学部修士論文, 第 4 章および第 5 章, 1989.
- 3) 麻生立男: “薄膜作成の基礎”, 第 2 版, 第 4 章, 日刊工業新聞社, 1984.
- 4) G.B.Brandt, et al: Appl. Opt., **12**, 2898, 1973.
- 5) 西原浩ら: “光集積回路”, 第 2 章—第 4 章, オーム社, 1985.