

|            |  |
|------------|--|
| 氏 名        | ば ば かず たか<br>馬 場 一 隆                                   |
| 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<br>(博士課程) 電子工学専攻                          |
| 学位論文題目     | 積層型偏光子に関する研究   |
| 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 御子柴宣夫<br>東北大学教授 潮田 資勝 東北大学助教授 皆方 誠 |

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 言

図 1 に示す様な厚さ数十  $\text{\AA}$  の金属と数千  $\text{\AA}$  の誘電体の交互多層膜よりなる積層型偏光子 (Laminated Polarizer, 以下 LAMIPOL と略す) は, 偏光子としては次の特長を有する。

- 1) 理論的に高消光比で低挿入損失
- 2) 素子長  $l$  を短くできる
- 3) 安定な機能
- 4) 量産可能

これらの点から LAMIPOL は小型で性能・経済性に優れた光デバイスコンポーネントの開発のために有用な素子であると言える。

LAMIPOL の特性は主に金属層の光学的性質に依存する。ところで LAMIPOL の金属層厚は数十  $\text{\AA}$  であり金属内の自由電子の平均自由行路長に比べて小さい上, 膜の構造も不連続な島状に近い構造になっていると考えられる。そのため, 実際の誘電定数はバルクのものとは異なったものになっていることが予想され, 素子の実際的な設計を困難にしていた。

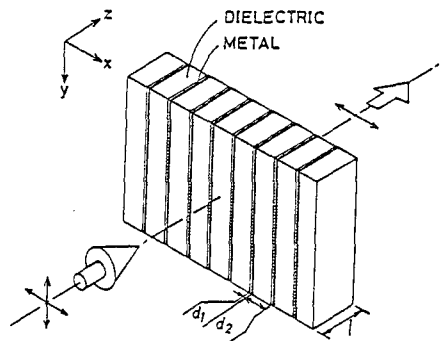


図 1 LAMIPOL の構造

本論文では金属薄膜の実効的誘電定数を数学的にモデル化し、そのパラメータの変化から実験結果の説明を試みる。その結果、本研究を通じ実験結果を良く説明出来る誘電定数モデルを得ることができ、LAMIPOLの実際的な設計が可能となった。また、LAMIPOLの特性を向上させるための指針を得ることができた。

## 第2章 積層型偏光子の試作と評価

本章ではLAMIPOLの実験的特性を明らかにする。金属材料としてはAlとAuを、誘電体としてはSiO<sub>2</sub>を用いた。Alは比較的連続に近い蒸着膜を形成し、Auは不連続な島状構造を形成しやすい。

LAMIPOLは図2に示す様な装置を用いて作製する。装置は基本的には真空蒸着装置とRFスパッタ装置を連結したもので基板を移動させることにより金属と誘電体を交互に積層していく。

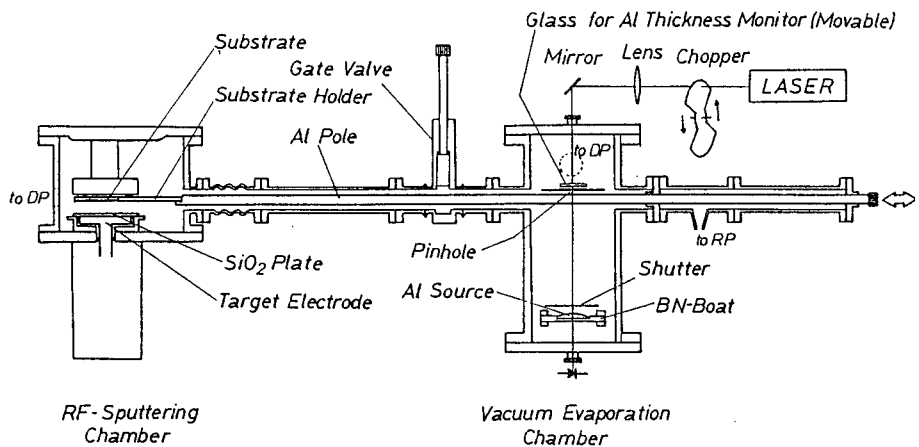


図2 LAMIPOLの作製装置

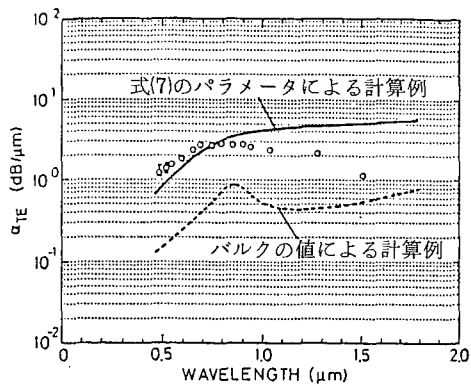
次に、試作した素子の減衰定数の波長依存性の測定を行なった。図3(a), (b), 図4(a), (b)に各々Al, Auに関して得られた結果を示す。破線はバルクの誘電率による理想的構造に対する理論値である。両者を比較すると以下のことが分かる。

- 1) AlによるLAMIPOLは傾向的には両者が良く似ている。ただし、定量的には実験値の方が1桁程度大きい。
- 2) AuによるLAMIPOLはTE波に対する傾向が異なる。TM波についてはAlと同様である。

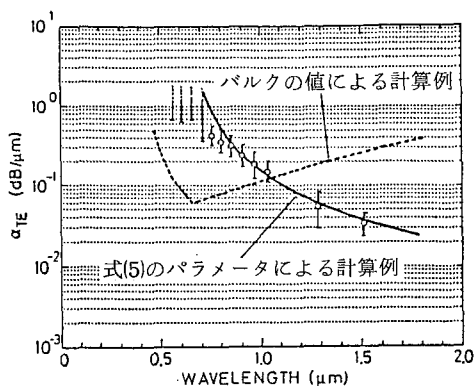
## 第3章 金属の誘電定数のモデル化と積層型偏光子の特性

本章ではLAMIPOLの実験的特性を説明するために金属の誘電率のモデル化を行ない、LAMIPOLの特性の変化を誘電率の変化と関連づけて検討を行なう。

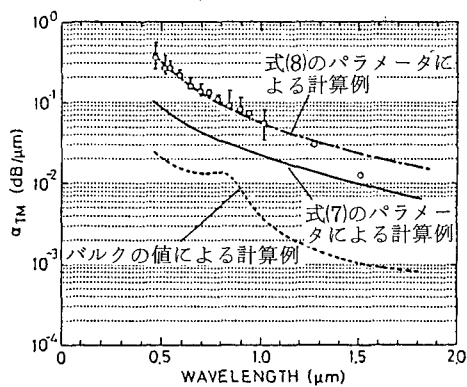
金属の誘電定数は古典的ドルーデ理論を用いて定式化できる。



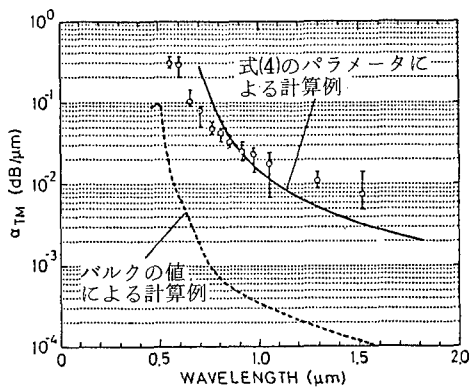
(a) TE波減衰定数



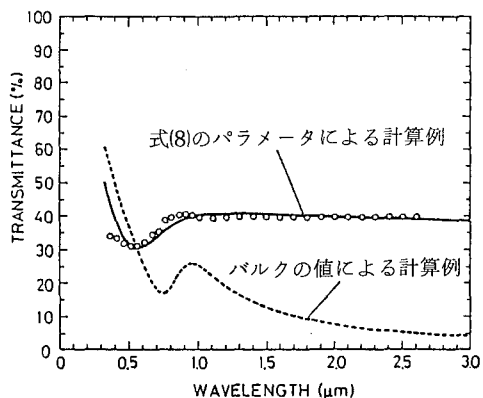
(a) TE波減衰定数



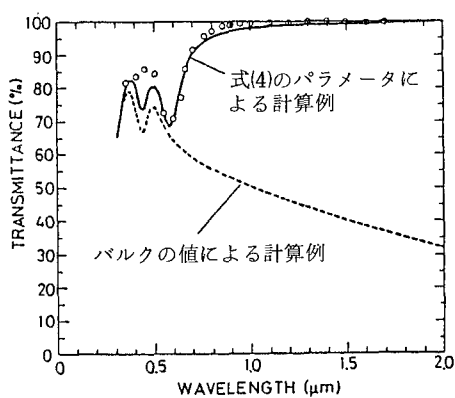
(b) TM波減衰定数



(b) TM波減衰定数



(c) Al蒸着膜の分光透過特性



(c) Au蒸着膜の分光透過特性

図3 Al-LAMIPOLの試作結果と単層膜の分光透過特性  
( $d_1 = 70 \text{ \AA}$ ,  $d_2 = 7800 \text{ \AA}$ )

図4 Au-LAMIPOLの試作結果と単層膜の分光透過特性  
( $d_1 = 20 \text{ \AA}$ ,  $d_2 = 7500 \text{ \AA}$ )

$$\epsilon = \epsilon_L + \epsilon_D + \epsilon_{IB} \quad (1)$$

ここで  $\epsilon_L$  は格子振動による項で実定数,  $\epsilon_D$  は自由電子の運動による項で,

$$\epsilon_D = \frac{\omega_p^2}{j\omega(j\omega + 1/\tau)} \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \omega_p^2 = N_e e^2 / m$$

$\epsilon_{IB}$  はバンド間遷移による項でここでは共振モデルで近似する。

TE波に対する実効的な誘電定数は膜の構造の影響が大きく, 島状構造をなす膜の自由電子の運動による項は調和振動子型のモデル  $\epsilon_0$  で近似されるものと考えられる。

$$\epsilon_0 = \frac{Q_0 \omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega/\tau_0} \quad (3)$$

LAMIPOIの実験的特性は特に自由電子の運動による項の緩和時間  $\tau$  や自由電子濃度  $N_e$  が薄膜形成条件によりバルクの場合より小さくなっていると考えることにより, ほぼ説明可能である。

#### 第4章 積層型偏光子の試作結果の検討

本章では, 前章で得られた誘電定数モデルを実際の LAMIPOI の試作結果に適用し, 実験結果の説明を試みる。そのために金属単層膜の分光透過特性を測定し, 現象論的最適モデル及びパラメータを推定した。なお, 以下添字 B はバルクのパラメータを表わす。

$A_u$  を用いた LAMIPOI の試作結果は金属膜が島状構造をなしていると考えることにより説明可能である。LAMIPOI の減衰定数は測定波長域が狭いので, 単層膜の分光透過特性の測定結果(図 4 (c)) により TE 波に対する実効的な誘電定数を推定する。島状構造の充填率を 0.4 と仮定することにより, 以下の調和振動子型のモデルのパラメータを得る。

$$\begin{aligned} Q_0 &= 0.13 \\ \tau_0 &= \tau_B / 5 \\ \omega_0 &= 3.14 \times 10^{15} \text{ (rad/sec)} \end{aligned} \quad (4)$$

これをもとに LAMIPOI の TE 波の特性を計算すると図 4 (a) の実線の様になる。また TM 波のドルーデ型のモデルを推定すると

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_B / 3.5 \\ \omega_p &= \omega_{pB} / 1.5 \end{aligned} \quad (5)$$

となり, 特性を計算すると図 4 (b) の実線の様になる。

$A_1$  を用いた LAMIPOI の試作結果は金属膜が島状構造から連続膜へ移る中間型の構造をなしていると考えることにより説明可能である。この様な膜の TE 波に対する実効的な誘電定数は

$$\epsilon_i = \epsilon_L + \epsilon_D + \epsilon_0 \quad (6)$$

と表わされる。分光透過特性の測定結果 (図 3(c)) により TE 波に対する実効的な誘電定数を推定例で示すと、

$$\begin{aligned}\omega_P^2 &= \omega_{PB}^2/2 \\ \tau &= \tau_B/22 \\ Q_0 &= 0.83 \\ \tau_0 &= 2.92 \times 10^{-16} \text{ (sec)} \\ \omega_0 &= 3.43 \times 10^{15} \text{ (rad/sec)}\end{aligned}\tag{7}$$

となり、それをもとに TE・TM 両波の特性を計算すると図 3(a)及び(b)の実線の様になる。このモデルでは TM 波の特性を十分に説明できないので、別に最適パラメータの値を推定すると (図 3(b) 中一点鎖点)

$$\omega_P^2 \tau = \omega_{PB}^2 \tau_B / 128\tag{8}$$

となる。偏波により実効的な誘電定数が異なる原因は膜内の緩和時間や自由電子濃度に不均一があるためであると考えられる。

## 第 5 章 積層型偏光子の高性能化の検討

本章ではそれまでの研究結果をもとに特に Al を用いた LAMIPOL の高性能化の検討を行なう。金属膜厚を大きくすると TE 波に対する実効的な誘電定数はよりバルクのものに近くなるが、TM 波に関しては大きな変化がない。誘電体厚を小さくすると、特に短波長側で消光比の改善が期待されるが、素子長は  $10 \mu\text{m}$  以下とする必要がある。

## 第 6 章 結 言

金属薄膜の実効的誘電定数を数学的にモデル化し、そのパラメータの変化から LAMIPOL の実験結果の説明を試みた。その結果、実験結果を良く説明することができ、LAMIPOL の実際的な設計が可能となった。

## 審査結果の要旨

近年光波の利用技術は、通信、情報の記録再生を中心として目覚ましい発展をとげつつあるが、光デバイス、素子の小型化高性能化はその基礎技術として重要性を増している。偏光子は受動素子として最も基本的なものの一つであり、多くのデバイス・システムに利用されている。本論文は、誘電体と金属薄膜を交互に積層した構造よりなる新しい偏光子について理論・実験の両面から行った研究をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒言である。第2章では積層型偏光子（以下 Lamipol と略す）について、試作と評価の結果を概説している。バルク金属の光学定数を基に、数十Åの金属と数千Åの誘電体を交互積層し、層に平行に光を伝搬させる場合の各偏光の伝送特性を解析し、実験と比較している。理論値と実験値には約1桁の開きがある事を指摘している。その由来と改善の方法を第3, 4章で詳細に検討している。Lamipol 内での金属薄膜の光学定数のモデル化が第3章の主題である。金属層がほぼ一様な連続膜と見なし得る時には、その複素誘電率は自由キャリアによる Drude 型の項と、バンド間遷移による共振型の項の和で表わされ、金属層が島状構造をなす時は島間の分極を表わす、充てん率に依存する共振項と Drude 項の和で表わされる誘電率をもつ一様な連続膜と等価であることを実験および理論解析により明らかにしている。これは Lamipol の設計上、また金属超薄膜の光学特性を知る上で重要な知見である。第4章では、金属の種類（Au と Al）、膜厚を変えて薄膜の特性を記述するパラメータがどう変化するか系統的に調べている。真空蒸着により作成した Al 膜では、キャリア密度×緩和時間はバルク Al に対し、 $1/30 \sim 1/100$  の程度であり膜厚の増加とともにバルクに近づくこと、同じく Au 膜では島状構造による共振項が優勢になり易く偏光子の特性上は不利であることを明らかにしている。

第5章では Lamipol の高性能化の検討を行っている。著者の実験に用いた装置により  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$  で挿入損 0.5 dB、消光比  $> 32$  dB の素子が得られたこと、金属・誘電体の厚さを選択すれば  $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$  で挿入損 0.6 dB、消光比 30 dB、 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$  で挿入損 0.3 dB、消光比 30 dB の Lamipol の製作が可能であることを示している。これは実用上重要な知見である。6章は結言である。

以上要するに本論文は、積層型偏光子の特性と金属超薄膜の光学的性質を実験・理論の両面から追求し、いくつかの有用な知見を与えたもので光電子工学の進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。