

氏 名 ^た滝 ^さ澤 ^{くに}國 ^{はる}治

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭 和 62 年 2 月 12 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭 和 43 年 3 月

東北大学工学部電子工学科卒業

学 位 論 文 題 目 電 気 光 学 効 果 を 用 いた 光 機 能 素 子 に 関 する 研 究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 西田 茂穂

東北大学教授 潮田 資勝

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 総 論

1970年の半導体レーザーの室温連続発振の成功と低損失な光ファイバーケーブルの開発は、光技術と半導体技術の連携を強め、光エレクトロニクス技術として成長した。特に近年は広帯域光通信網の大規模な建設や光ディスクの実用化など、その発展には目を見張るものがある。これらの光技術では、光の強度を制御し、伝送しているが、レーザー光の持つ時間的および空間的コヒーレンス特性を十分活用して光エレクトロニクス技術を飛躍的に発展させるためには、レーザー光の位相、周波数、偏光などを制御できる光機能素子の開発が極めて重要である。光機能素子には、電界、磁界、音波などと光との相互作用が利用されており、中でも電界により物質がその屈折率を変化する電気光学効果は最も応答が速く、既に光変調器、光スイッチ、および波長フィルターなど種々の光機能素子が研究・開発されている。これらの光素子は主に光通信への応用を指向しているが、電気光学効果を用いた光機能素子の持つ優れた高速応答特性や非線形特性は、信号処理や演算などの情報処理技術の高速化を図る上でも、極めて有用である。

本論文はこの様な観点から、電気光学効果を用いた光機能素子の情報処理技術への応用を試み、4種類の新素子を考案・開発し、それらの基礎的動作を解明したものである。そのために結晶透過光の電界による位相変化の解析とその測定法の開発を行い、幾つかの結晶の電気光学係数を精密に測定した。これらの結果に基づきまず、種々の関数を高速で表示する関数表示器と高速アナログ

デジタル (A/D) 変換器を考案し、バルク結晶から成る複数の光変調器を用いて開発した。次に、薄膜光導波路から成るフレネル帯板に光変調や光偏光向機能を付加した新しい光変調器と光走査器を考案・開発した。本研究から、電界による光の位相変化に関する新しい知見、光の位相変化の高精度測定法並びに4種類の光機能素子の新規性および有用性を確かめた。

第2章 等軸および一軸結晶を透過する光の印加電界による位相変化の解析

電気光学効果を用いた光機能素子の多くは、電界による光の位相変化を利用しているが、電気光学結晶は圧電性を有するため、構成によっては電気光学効果による屈折率変化のみならず、逆圧電効果による光路長変化が位相変化に影響を与える場合がある。従来、この光路長変化にはほとんど注意が払われていなかった。例えば光の位相変化の計測から結晶の電気光学係数を評価する場合、これまでは逆圧電効果に基づく位相変化を電気光学効果に基づく位相変化に含めて電気光学係数を求めていた。電気光学効果の機構を考察する場合、あるいは実際の素子設計においてもこのような扱いは問題である。

このため本章では、結晶の電気光学効果に基づく屈折率変化および逆圧電効果に基づく歪テンソルの変化を解析した。この中でも光機能素子への応用上特に重要な種々の結晶類について、電界方向と光の位相変化の関係を明らかにした。また、電界による屈折率変化と光路長変化を考慮した実効的電気光学係数を示すと共に、素子設計や電気光学係数の測定において従来見落とされていた幾つかの問題点を指摘した。

第3章 結晶の電気光学係数の測定

光機能素子の設計には電気光学係数の正確な値を知る必要がある。これまでに様々な電気光学係数測定法が開発されているが、高精度で軽易な方法はまだ確立されていなかった。

そこで本章では、2つの新しい測定法を考案し、それらの測定精度を解析すると共に、実験によりその有用性および簡便性を示した。一つは、両端面を平行に研磨した結晶にレーザー光を入射するという極めて単純な構成で光の位相変化を測定する反射光干渉法であり、他は、2個の光変調器の出力信号の間の位相差を測定するリサーチ法である。両測定法を用いて、後述する4種類の光機能素子の設計に必要な LiTaO_3 および LiNbO_3 結晶の電気光学係数の値を高精度で明らかにした。

第4章 電気光学効果の関数表示器への応用

チェビシェフ多項式やルジャンドル多項式は情報処理技術に不可欠な直交関数であるが、それらの値を精度よく求めるには多くの数値計算を要し、高速でグラフ表示することは容易ではなかった。

そこで本章では、直交ニコル型光変調器の出力対電圧特性が正弦2乗関数を示すことを利用して、上記関数を表示する関数表示器の開発を試み、その動作特性について論じた。一例としてバルク結晶の長さが整数比の関係にある複数の光変調器を用いて第2種チェビシェフ多項式を表す実験プロ

ック図を図1に、実験結果を図2に示す。表示に要する時間は2.5m秒であるが、1n秒程度の応答時間を持つ光変調器は比較的容易に得られるため、従来の表示装置に比べて桁違いの高速度で関数を表示することができる。また、 $x^n (|x| \leq 1)$ やベッセル関数等の表示実験と共に、高次方程式を高速で解く方法も明らかにした。

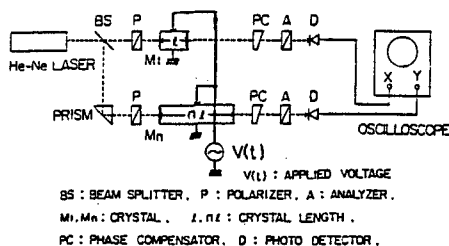


図1 チェビシェフ多項式を表示するための実験ブロック図

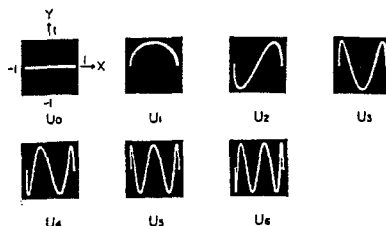


図2 チェビシェフ多項式を表示した実験結果

第5章 電気光学効果のアナログーデジタル変換器への応用

A/D変換器は情報処理技術に必須の要素であるが、従来の電子回路を用いた素子では高分解能化に伴い比較器の数が膨大になるため、高速度と高分確能を両立させるのは困難であった。

そこで本章では、直交ニコル型光変調器が2進数に類似の繰返し特性を持つことに着目し、バルク結晶から成る光変調器のA/D変換器への応用を試み、まず n 個の光変調器と比較器で n ビットのA/D変換を行う並列型素子を開発した。3ビットの並列型素子を図3に示すが、1:2:4の電極長比の関係より3個の光変調器の出力対電圧特性は図4(a)で与えられる。比較器のしきい値を同図の如く定めれば、アナログ電圧(V)を2進級(図4(b))に変換することができる。次に、この周期特性を電氣的に増大することを検討し、1個の光変調器とダイオード回路から成るハイブリッド型素子を開発した。正弦波電圧(11MHz)の3ビットの2進級への変換実験より、この素子の高速性と簡易性を示すと共に、両素子の分解能と応答周波数の限界を解明した。

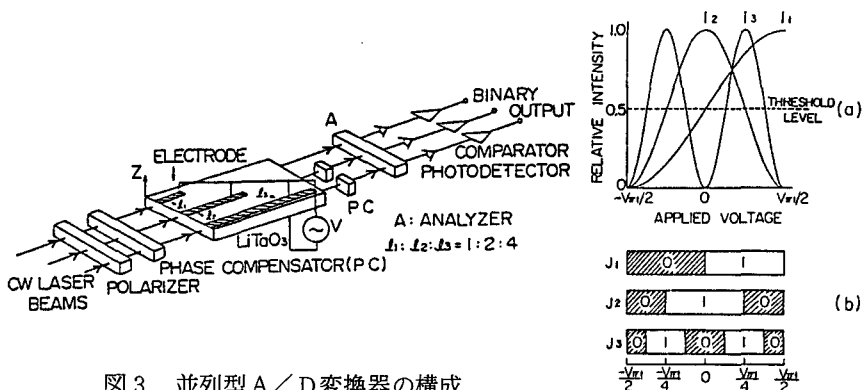


図3 並列型A/D変換器の構成

図4 光変調器の出力対印加電圧特性(a)とそれらを比較器で量子化した結果(b)

第6章 電気光学効果の光導波路形フレネル光変調器への応用

バルク結晶から成る光機能素子は、大型の駆動装置を必要とし温度変化の影響を受け易いなどの問題を抱えている。一方、薄膜光導波路で光機能素子を構成すると、上記の問題を解決できると共に、バルク素子では得られない新しい機能を実現することが可能である。

そこで本章では、光機能素子の薄膜化を試み、集光と光変調機能を合わせ持つフレネル光変調器を考案・開発した。まず、素子をチャンネル形光導波路列から成る振幅型(図5)とスラブ形光導波路から成る位相型に分類し、それらのフレネル帯板としての集光特性が電界で制御されること、およびその制御に最適な電極構造を解明した。次に、薄膜光導波路製作技術を確立し、LiNbO₃結晶から成る上記2素子の試作・実験より、それらの基本的動作を確認した。13本の光導波路から成る振幅型素子の焦点面上の光強度分布の電界による変化の様子を図6に示すが、焦点Pの近傍において収束光が高消光比で変調されることが判る。本素子は集光と光変調機能を合せ持つため、能動的フーリエ変換素子としての利用も可能である。

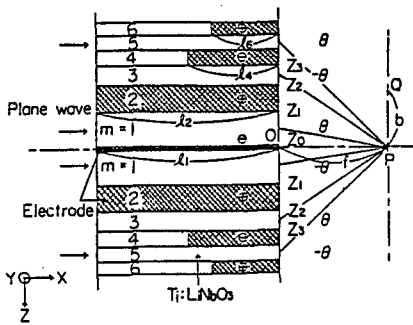


図5 振幅型フレネル光変調器の構成

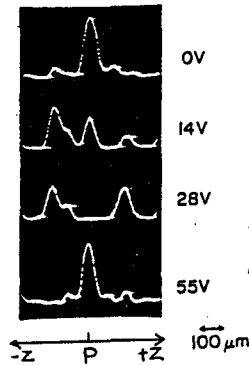


図6 印加電圧の変化に対する焦点面上の光強度分布の変化

第7章 電気光学効果の光導波路形フレネル光走査器への応用

光ビームの進行方向を制御する光走査器には集光レンズが必須であり、素子の高信頼化、小型化には両者を同一基板上に形成する必要があるが、両者の製作法が大幅に異なるためその集積化は容易ではない。

そこで本章では、前章のフレネル光変調器の動作原理に基づき、集光と光走査を同時に行うことのできるフレネル光走査器を考案・開発した。まず、同じ長さの交差電極とチャンネル形光導波路列を図7の如く配置すれば、集光スポットが電圧に応じてレンズの焦点面上を連続的に移動するこ

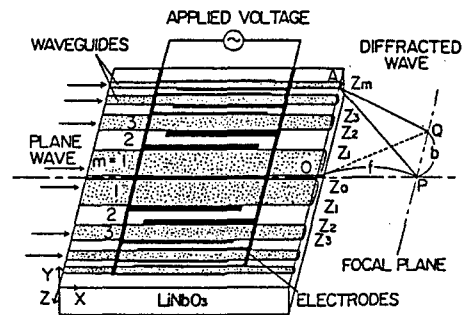


図7 導波路形フレネル光走査器の構成

とを解明した。次に、素子の解像度を求め、最適な電極幅を決定した。さらに、22本の光導波路から成る光走査器の試作と、集光スポット（半値全幅 $47\ \mu\text{m}$ ）の $140\ \mu\text{m}$ にわたる走掃実験結果（図8）より、本素子の新規性および有用性を明らかにした。

第8章 結 論

本論文では、電気光学効果の情報処理用光機能素子への応用に関する研究を行い、4種類の新素子が従来にない高速性や複合機能を備えていることを解析と実験により明らかにした。

まず素子製作に先立ち、結晶透過光の電界による位相変化を解明し、構成によっては電気光学効果のみならず逆圧電効果も位相変化を誘起することを示した。次に、従来になく簡便な2つの電気光学係数測定法を考案し、種々の結晶の電気光学係数の値を高精度で求めた。

この結果に基づき、まず、多項式や特殊関数を高速で表示する関数表示器を考案・開発すると共に、高次方程式の解法を示した。続いて、並列型およびハイブリッド型A/D変換器を開発し、両者を比較検討した。その結果、後者は優れた応答特性を持ち、5ビット以下の分解能では構成も簡易であることや、両者を組み合わせれば高速・高分解能なA/D変換器が得られることを明らかにした。

更に、光機能素子の実用化を目指して薄膜光導波路製作技術を確立し、集光と光変調あるいは集光と光走査機能を合せ持つフレネル光変調器および光走査器を考案し、開発した。両者に電圧を加えると、前者では集光スポットが変調されること、および後者では集光スポットが焦点面上を移動することを具体的に明らかにした。

以上の研究結果に基づき、今後は関数表示器やA/D変換器の薄膜化およびフレネル光変調器や光走査器の性能向上などの技術的進展を図ることが望まれる。このとき、光の電界による位相変化に関する知見やその測定法は、素子設計並びに評価に有用であろう。終りに本研究の成果が光エレクトロニクスの発展に寄与することを期待する。

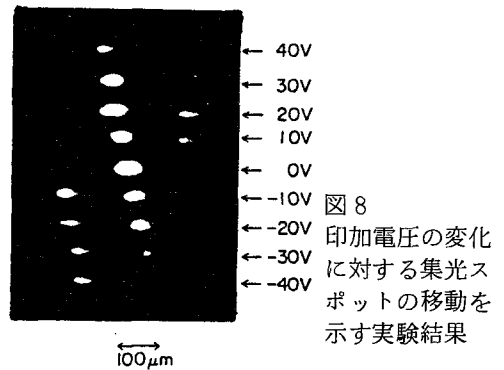


図8
印加電圧の変化
に対する集光ス
ポットの移動を
示す実験結果

審査結果の要旨

光エレクトロニクスの分野では、レーザー工学の進展に伴って、光通信の実用化をはじめ、光計測・制御、光情報処理などの広汎な応用が展開されている。しかし、レーザー光のもつ優れた時間的および空間的コヒーレンス特性を十分に活用するためには、レーザー光の強度だけでなく、周波数や位相、偏光性、指向性などを制御できる新しい光機能素子の開発が極めて重要な課題である。

著者はこのような観点から、電子的制御が可能で、応答速度の早い電気光学効果を利用する光機能素子の研究開発に取り組み、4種類の新しい素子を考案、試作し、それらの基本的特性を明らかにした。本論文はその成果をとりまとめたもので、全編8章よりなる。

第1章は総論である。第2章では、結晶の電気光学効果に基づく屈折率変化および逆圧電効果による歪テンソルの変化について理論的解析を行い、素子設計や電気光学係数の測定において従来見落されていた問題点を詳細に論じている。これらは有用な知見である。

第3章では、光機能素子の設計に要求される電気光学係数の正確な値を得るために、反射光干渉法とリサーチ法の2つの新しい測定法を考案し、それらの測定精度を解析すると共に、実験によりその有効性と簡便性を実証している。

第4章では、直交ニコル型光変調器の出力対電圧特性が正弦2乗関数を与えることを利用して、チェビシェフ多項式やルジャンドル多項式などを高速でアナログ表示する関数表示器の開発を行い、動作特性を解明している。

第5章では、さらに直交ニコル型光変調器が2進数に類似の繰返し特性をもつことに着目して、光変調器のA/D変換器への応用を試み、この素子の高速性と簡易性を示すと共に、分解能や応答周波数限界を論じている。

第6章および第7章は、光機能素子の薄膜集積化を意図したものであり、幅の異なるチャンネル型光導波路列中の導波光の位相を電気光学効果により制御する方法を提案し、試作を行っている。すなわち、第6章では光変調と集光を、また第7章では光走査と集光を同時に行うことのできる光導波路型フレネル光変調器および光走査器をそれぞれ実現し、それらの有用性を実験的に明らかにしている。これらは実用上重要な成果である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、電子工学的に操作、制御の可能な電気光学効果を光機能素子へ応用することを試み、従来実現されていなかった新しい素子の研究開発を行って、幾つかの重要な知見を得たものであって、電子工学ならびに光エレクトロニクス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。