

氏 名	くし びき じゆん いち 櫛 引 淳 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 5 1 年 3 月 2 5 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 電気及通信工学専攻（博士課程）
学 位 論 文 題 目	弾性表面波による光表面波のブラッグ回折に関する 研究
指 導 教 官	東北大学教授 柴山 乾夫
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 柴山 乾夫 東北大学教授 清水 洋 東北大学教授 西田 茂穂 東北大学教授 御子柴宣夫 東北大学助教授 中鉢 憲賢 東北大学助教授 山之内和彦

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

1969年以來，光ICという技術的思想のもとに，光表面波（optical guided waves）による通信，情報処理技術の開発が急速に進められている。この光IC技術に関連して，弾性表面波と光表面波との相互作用を利用した表面音響光学素子（光偏向器，光変調器，モード変換器など）の研究が活発になっている。本研究は，弾性表面波による光表面波のブラッグ回折について，表面音響光学素子設計にあたっての工学的基礎を確立することを目指して行ったもので，特に，理論解析と実験結果との対比を重要視しながら研究を進めている。具体的には，非圧電基板上に形成したZnO膜によるモノリシック構成の表面音響光学素子を開発するとともに，理論的ならびに実験的に詳細に検討を行い，回折効率の顕著な膜厚および弾性表面波周波数依存性を明らか

にし、表面音響光学素子の光 IC デバイスへの応用にあたっての基本的設計指針を示している。

第 2 章 薄膜光導波路を伝搬する光表面波

本章では、第 4 章以下で述べる弾性表面波による光表面波のブラッグ回折の研究を行う上で、一つの重要な基盤である薄膜光導波路を伝搬する光表面波について、理論的ならびに実験的検討を行っている。まず、一般的な薄膜光導波路を伝搬する光表面波の理論的取り扱いを述べ、ZnO 膜・等方性基板構造に適用している。その解析結果に基づき、一例として熔融石英基板を用いた場合の ZnO 薄膜光導波路をとりあげ、真空中の波長が 6328 \AA の He-Ne レーザ光に対して、数値計算を行い、TE および TM モードの分散特性、ならびに両モードの電界およびパワーの空間分布を示している。この薄膜光導波路における光表面波は、膜厚および ZnO と基板の屈折率によって決定され、各モードは分極 (TE 又は TM) とモード次数によって区別され、それぞれ固有の実効屈折率をもっており、さらに、電磁場およびパワーはほとんど膜内に集中し、基板および空気中へのしみ出しは非常に少ないことが明らかにされている。実験的には、光導波路用材料として本研究で使用している ZnO 膜の特性を明らかにするため、その伝搬損失をとりあげ、伝搬損失と膜作成条件、とくに基板温度との関係について X 線回折および電子顕微鏡を用いて詳細に検討した結果、DC 二極スパッタ法でガラス基板上に形成される多結晶 ZnO 薄膜光導波路は膜作成条件を制御することにより C 軸配向の良好で、表面の滑らかな低伝搬損失 (as-sputtered) の膜で、 7 dB/cm 以下のものを再現性よく作成できることを示している。

第 3 章 層状媒体を伝搬する弾性表面波

本章では、弾性表面波による光表面波のブラッグ回折の研究を進める上で、第 2 章で述べた光表面波とならんでもう一つの重要な基盤である層状媒体における弾性表面波の励振および伝搬特性について理論的検討を行っている。すなわち第 2 節で、まず異方性層状媒体を伝搬する弾性表面波の一般理論解析を行い、第 3 節および第 4 節で、それぞれ ZnO 膜・等方性基板構造および ZnO 膜・サファイア基板構造に適用している。第 3 節では、特に熔融石英基板上に形成した ZnO 膜をとりあげて数値計算を行い、レイリー波に対する励振および伝搬特性を示している。これらの結果は、第 4 章以下の弾性表面波による光表面波のブラッグ回折の数値解析および実験に直接的に関係するものである。さらに第 4 節では、高周波帯における弾性表面波の伝搬減衰の問題を解決するため基板としてサファイア単結晶をとりあげ、スパッタ法あるいは化学気相輸送法によって形成できる現実的な構成、(0001) ZnO 膜・(0001) サファイア基板構造および $(11\bar{2}0)$ ZnO 膜・ $(1\bar{1}02)$ サファイア基板構造における弾性表面波の励振および伝搬特性について検討している。これらの異方性層状媒体を伝搬する弾性表面波は、ZnO およびサファイ

アのもつ異方性のため伝搬モードは、一般にはハイブリッド・モードとなり、ある特定の伝搬方向についてのみ純粋なレイリー波とラブ波に分離できることを明らかにしている。

第4章 弾性表面波による光表面波のブラッグ回折の解析

本章では、本論文の主題である弾性表面波による光表面波のブラッグ回折についての詳細な理論解析を行っている。まず、弾性表面波の歪みテンソル、光表面波の電界ベクトル、光弾性定数テンソル、誘電率テンソルなどの諸量のマトリクス表示を用いて、弾性表面波の歪みおよび光表面波の電界の空間分布を厳密に考慮に入れたモード結合方程式によって、回折効率の一般的な理論式を導いている。次に、具体例としてZnO膜・溶融石英基板構造をとりあげ、また、弾性表面波としてはレイリー波を、光波としては真空中の波長が 6328\AA の光をとりあげて数値計算を行い、ブラッグ条件、回折効率の膜厚および弾性表面波周波数依存性について検討している。同一モード間ブラッグ回折およびモード変換ブラッグ回折のいずれの場合も、回折効率は膜厚および弾性表面波周波数によって大きく変化し、回折効率が最大、最小となる膜厚および弾性表面波周波数が存在することを明らかにし、次章の実験との対応に備えている。

これまで回折効率の理論値を算出できる詳細な解析はなされていなかったが、本章で明らかにした解析結果は弾性表面波による光表面波のブラッグ回折の実験、さらにはこの回折現象を利用した表面音響光学素子の設計に必要な基本的諸量を与えるものである。

第5章 弾性表面波による光表面波のブラッグ回折の実験

本章では、非圧電基板上的のZnO薄膜によるモノリシック構成の表面音響光学素子(図1参照)を実現するとともに、これらの素子の特性について、実験的ならびに理論的に詳細に検討し、回折効率は膜厚および弾性表面波周波数によって変化し、その根本原因は弾性表面波の歪みの変化にあることを明らかにしている。

まず、第2節では、TEモードの光表面波による同一モード間回折をとりあげて、弾性表面波による光表面波のブラッグ回折の実験方法およびその基礎的特性について詳述している。第3節では、弾性表面波周波数が 130MHz のときの同一モード間回折における回折効率の膜厚依存性について実験を行い、顕著な膜厚依存性を確認している。図2に示されるようにその膜厚依存性についての実験結果と理論計算結果とは、その傾向および絶対値を比較してもよく対応している。第4節では、分極回転の伴うTE-TMモード変換回折について、弾性表面波周波数 226MHz で実験を行い、同一モード間回折と同様、顕著な膜厚依存性があり、理論値ともよく一致することを示している。さらに、詳細に理論的検討を行った結果、回折効率の膜厚および弾性表面波周波数依存性は、弾性表面波の歪みの空間分布の fH (弾性表面波周波数と膜厚との積)による変

化を調べることによって説明できることが明らかになっている。

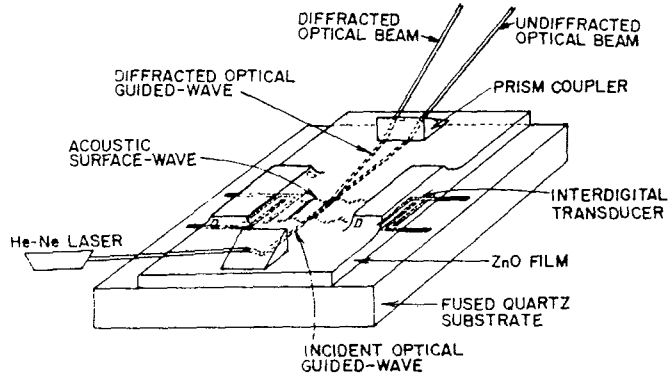


図1 モノリシック構成のZnO薄膜ブラック偏向器

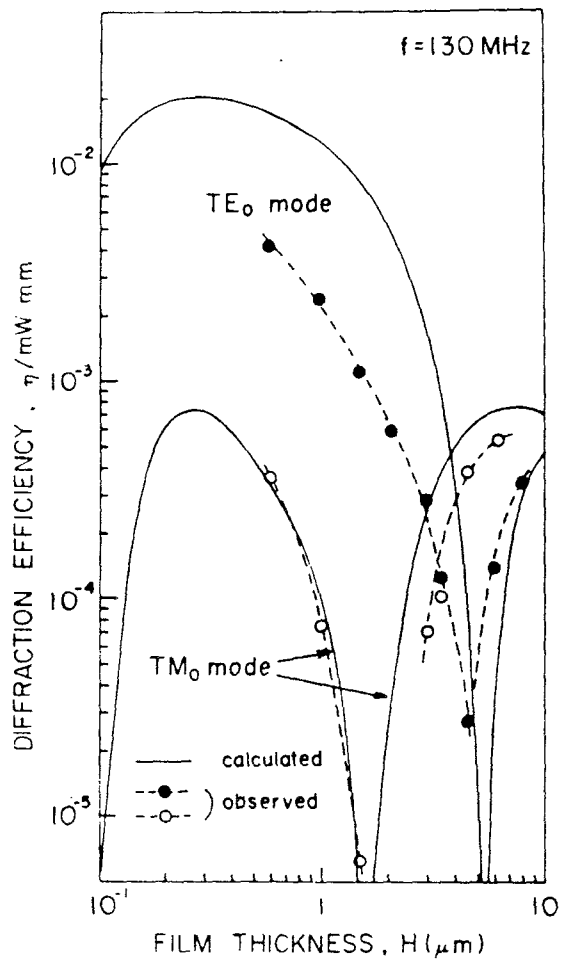


図2 同一モード間ブラック回折における回折効率の膜厚依存性の実験値と理論値

第6章 弾性表面波の歪みの多層構成による変化を利用した回折効率の改善

本章では、表面音響光学素子の設計にあたり、一つの制限を与えるものと考えられる回折効率の膜厚および弾性表面波周波数依存性の問題を解決するため、弾性表面波の歪みの分布を多層構成によって変化させる新しい回折効率の改善法を提案している。具体的例として、歪みの制御膜として熔融石英膜をとりあげ、ZnO膜・熔融石英基板構造に適用して理論的ならびに実験的に検討を行っている。

まず、相互作用領域上に音速の速い膜をもうけた多層構成によって弾性表面波の歪みの空間分布を制御できることを示し、その歪み変化によって回折効率を変えることができることを数値解析で明らかにしている。すなわち、回折効率は熔融石英の制御膜の膜厚によって大きく変化し、制御膜のないときの回折効率が比較的小さい場合には、制御膜の効果は大きく、もともと回折効率が比較的大きい場合には、むしろ制御膜によって回折効率は低下することを明らかにしている。

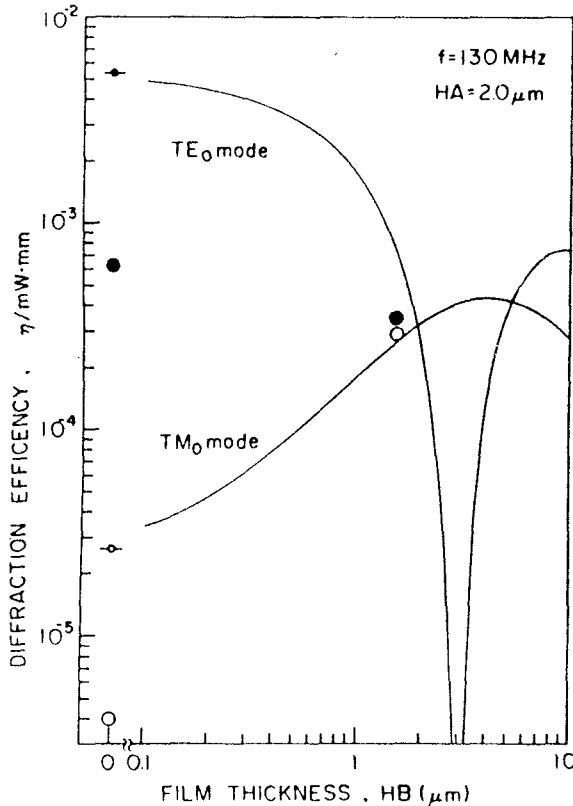


図3 同一モード間ブラッグ回折における回折効率の
熔融石英制御膜の膜厚 HB に対する変化(HA ; ZnO の膜厚)
実線;理論曲線
● および ○; $HB=0$ のときの理論値
● および ○; 実験値

さらに、回折効率の改善のためにもうけられた制御膜内にも弾性表面波パワーが分布し、ZnO膜内へのパワーの集中度が低下するため、制御膜をつけたときの最大回折効率は、制御膜をつけないときの最大回折効率を越えることはあり得ないことを示している。次に、熔融石英制御膜をRFスパッタ法によってZnO膜・熔融石英基板構造の相互作用領域上に形成した試料を用いて、TE₀およびTM₀モードによる同一モード間回折の実験を行い、理論解析の妥当性を実験的に検証している（図3参照）。

第7章 結 論

本論文では、表面音響光学素子の回折効率が、膜厚および弾性表面波周波数に依存することが明らかにされた。表面音響光学素子の設計にあたって、この回折効率の膜厚および弾性表面波周波数依存性を充分考慮することが基本的設計条件となるが、さらに、光導波路の膜厚が規定された場合でも、本研究で明らかにした多層構成による回折効率の改善法をとりいれることによって、表面音響光学素子の適用範囲を広げることができる。これらの特性は、他の光導波路用材料および構成の場合にも同様に現われると考えられる。

本研究により、弾性表面波による光表面波のブラッグ回折現象を用いた表面音響光学素子の工学的基礎が確立されたものと言える。これらの結果は光ICデバイスの設計に充分応用できるものとする。

審査結果の要旨

光集積回路の開発研究に関連して、最近、弾性波による光表面波の回折現象を応用した表面音響光学素子が出現している。本論文は、薄膜導波路中を伝搬する光波の弾性表面波によるブラッグ回折をとりあげて、表面音響光学素子設計の基礎を確立すべく、理論と実験の両面から詳細な研究を行ったもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。第2章および第3章ではそれぞれ、薄膜光導波路中を伝搬する光表面波、および層状媒体を伝搬する弾性表面波の伝搬特性について理論的検討を行っている。また、本研究遂行にあたっての技術的な基盤となる光波ならびに弾性表面波の送受に関する実験方法をのべている。解析ならびに実験にとりあげた導波路の構成は、非圧電基板上にZnO膜を設け、ZnO膜に光の導波と弾性表面波の励振の両方の働きをさせる構成であって、いわゆるモノリシック構成の素子の実現の基礎となるものである。

第4章では、本論文の主題であるブラッグ回折現象について詳細な理論解析を行っている。解析では入射光と回折光との間でモード変換を生じる場合と生じない場合に対し、電界および弾性表面波の歪みの空間分布を考慮に入れて厳密に取扱っている。その結果、回折効率の膜厚ならびに弾性表面波周波数に対する依存性を初めて明らかにし、その原因が主として弾性表面波の歪み分布の変化によるものであることを示している。

第5章では、熔融石英基板上にZnO膜を設けて構成した、ZnO膜・熔融石英基板構造のモノリシック表面音響光学素子の実現に成功している。この素子を多数作成して第4章における理論解析結果の妥当性を実験的に検証している。適当な条件で設計すればVHF帯の小さな音響パワーで90%以上の光波の回折が容易に得られることを実験的に示している。

第6章では回折効率にあずかる各因子についてさらに深く理論的考察を行い、例えば光導波路の膜厚が指定された場合でも回折効率を低下させることなしに素子を設計する方法を提案している。これは光導波路の相互作用領域の上にさらに歪み制御膜を設けるもので、これによって弾性表面波の歪みの空間分布を変化させるという着想である。具体例として、SiO₂を歪み制御膜に用いて理論と実験との間により対応を得ている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、表面音響光学素子の基礎的研究として、良好な回折効率を有する素子の実現をめざして行った研究で、素子の設計上幾多の重要な知見を与え、さらに非圧電基板上に回折効率の優れたモノリシック構成の素子を実現するなど、電子工学および通信工学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。