

氏名・(本籍)	近 藤 順 悟(愛知県)			
学位の種類	博 士 (工 学)			
学位記番号	工博乙第 103 号			
学位授与の日付	平成 19 年 3 月 23 日			
学位授与の要件	学位規程第 5 条第 2 項該当			
研究科・専攻の名称	電子科学研究科 電子応用工学			
学位論文題目	広帯域・低駆動電圧薄板型LiNbO ₃ 光変調器に関する研究			
論文審査委員	(委員長)			
	教授	皆 方 誠	教授	山 口 十六夫
	教授	岡 本 尚 道	教授	天 明 二 郎
	教授	大 坪 順 次		

論 文 内 容 の 要 旨

インターネットによるマルチメディア通信の発展は、ブロードバンド化、高ビットレート化の波を大きく押し進め、光変調速度 40 Gb/s 以上の超高速光伝送システムの必要性を加速させた。これを実現するためには、超高速、低駆動電圧、広波長帯域、低光挿入損失の光変調器が要求されており、最も有望であるニオブ酸リチウム (LiNbO₃) 光変調器の重要性がさらに高まっている。マッハツェンダー干渉 (MZ: Mach-Zehnder Interferometer) 型光導波路と進行波形電極を有する LiNbO₃ 光変調器は、広い波長帯域をもち、光ファイバとの整合性がよく光挿入損失を小さくでき、材料が高温まで安定である。しかし、電界吸収 (EA: Electro-Absorption) 型光変調器や半導体 MZ 型光変調器と比較して駆動電圧が高いという短所があった。

LiNbO₃ 光変調器の変調帯域は、光波と変調波 (マイクロ波) の速度に差がある場合に制限されてしまう。したがって、速度を一致 (速度整合) させるためにマイクロ波の実効的な屈折率を低減し光波の屈折率に合致させる手法が用いられている。従来では、LiNbO₃ 基板と電極間に低誘電率の SiO₂ バッファ層を形成し速度整合を達成している。これに対し、皆方は、LiNbO₃ 基板の裏面を薄片化することにより、そこにできた空気層に電界を効率的に漏れ出させマイクロ波実効屈折率を低減し速度整合条件を満足できることを見出した。さらに、温度安定性の高い X-cut LiNbO₃ 基板を用いることにより、バッファ層が必要なくなり光導波路に効率的に電界が印加できるため低駆動電圧化も同時に達成した。しかし、速度整合を得るためには、LiNbO₃ 基板の厚みを 10 μm 以下まで薄片化する必要があり、デバイスの作製方法および信頼性を確保するための実用構造の研究が必須であった。

本研究は、生産性、および信頼性に優れた薄片化構造について検討した。均一に薄板研磨した X-cut LiNbO₃ 光変調器基板、低誘電率層、X-cut LiNbO₃ 支持基板から構成される薄板型光変調器について、構造設計技術、素子製作技術、実装技術、信頼性技術を確立して変調帯域幅 50 GHz 以上、3 dB 帯域幅 $f_m = 25 \text{ GHz}$ 、かつ駆動電圧 $V_\pi = 2 \text{ V}$ で動作できる光変調器を実現した。本論文は、序論と結論を含む全 9 章から構成されている。

第 1 章では、本研究における背景および目的について述べている。

第 2 章では、KrF エキシマレーザにより裏溝構造を形成し、薄片化構造を有する光変調器が速度整合条件を満足できることを原理実証した。さらに、実用性のある薄片化構造について検討し、2 段裏溝付き光変調器にて変調帯域幅 50 GHz 以上、43.5 Gb/s、2.8 V の特性を達成した。

第 3 章では、生産性、および信頼性に優れた X-cut LiNbO₃ 薄板型光変調器を考察し、低駆動電圧、かつ速度整合およびインピーダンス整合を達成するための電極構造および LiNbO₃ 基板厚みを検討した。その結果、電極間ギャップ $G = 25 \mu\text{m}$ 、LiNbO₃ 基板厚み $T_{LN} = 7.3 \mu\text{m}$ の場合、3 dB 変調帯域幅 $f_m = 25 \text{ GHz}$ 以上、電極長 $L = 4 \text{ cm}$ 以上において駆動電圧 $V_\pi = 2 \text{ V}$ 以下になることを明確にした。

第 4 章では、 $T_{LN} = 7 \sim 8 \mu\text{m}$ における光導波路設計について検討し、薄板型光変調器では、光導波路は従来構造に比べて強い閉じ込め効果をうけることを見出した。LiNbO₃ 薄板構造における T_i 拡散導波路のシングルモード化について検討し、光モードサイズの T_i 厚み、基板厚み依存性の評価を行い、最適光導波路条件を明確にした。さらに、薄板型光変調器における消光比劣化の原因を解析し、作製した光導波路の伝搬損失と結合損失が従来構造の光導波路と同等に低損失であることを実証した。

第 5 章では、薄板型光変調器の低誘電率層に要求される電氣的、機械的特性について明確にした。フィルム接着法により形成した低誘電率層について、接着強度、高周波帯での誘電特性、アウトガス発生を評価した結果、光通信部品用として信頼性、耐久性を確保できることを明確にした。

第 6 章では、薄板型光変調器の実装技術について、高周波特性におけるリップル発生の原因を解析し、LiNbO₃ 基板厚み方向の共振によることを明確にした。またその対策として、支持基板上に導電層を形成することにより共振周波数を 300 GHz 以上の高周波側にシフトできることを実証した。また、反射減衰量の低減、高周波実装については、従来技術を適用できることを明確にした。以上のように最適設計した薄板型光変調器を作製しその特性を評価した結果、43.5 Gb/s、2 V の目標動作を達成した。

第 7 章では、薄板型光変調器の信頼性、耐久性を評価するために、温度サイクル試験とドリフト特性を測定した。その結果、光通信用 Telcordia 試験規格で定められている -40°C から 85°C の温度サイクル試験 500 回を実施し、光挿入損失、消光比、 V_π の変動が規格内に抑えられることを実証した。また、 $100^\circ\text{C}/5000$ 時間の長期 DC ドリフト試験の結果、5000 時間経過後も試験規格であるドリフト量 100% 以内に抑えられることを実証した。この結果、実動作温度 60°C で 21 年に相当する期間ド

リフト量が約 3 5 %以内という安定動作を明確にした。

第 8 章では、本研究で開発した広帯域・低駆動電圧光変調器の応用と将来展望について述べた。応用では、7 6 GHz ミリ波発生を実証し、4 0 Gb/s トランスポンダーへの適用について明確にした。

第 9 章では、本論文の結論を述べている。

以上、本論文は、超高速光伝送システム用の広帯域かつ低駆動電圧薄板型 LiNbO_3 光変調器の実用化に関する研究であり、これを実現するための低駆動電圧設計、素子製作技術、実装技術、信頼性技術について内容をまとめたものである。

「論文題目の欧文は

Study on Thin-Sheet LiNbO_3 Optical Modulator with Broad Bandwidth and Low-Driving-Voltage for Practical Use

である。」

論文審査結果の要旨

本論文は、次世代光通信用超高速・広帯域光変調器に関して研究した結果を纏めたもので、全編9章より成る。第1章は序論であり、本研究の背景、現状と将来予測、および本研究の目的などを述べている。

第2章では、高性能光変調器構造として提案されたCOVAXの概念に基づいて新たに考案された裏溝型光変調器を取り上げて、その概念と特徴、および試作・特性評価結果を論じている。その成果として、X-cut LiNbO₃光学結晶基板とレーザアブレーション技術を用いて試作した変調器により、波長1.5 μmにおいて変調帯域幅50GHz以上、変調速度43Gbps、駆動電圧2.8Vの特性を得ており、広帯域特性、速度整合、インピーダンス整合および低駆動電圧特性等を確認している。

第3章では、COVAXの概念をさらに進め、生産性、実用性、信頼性に富んだ次世代の実用型高速・広帯域特性と低駆動電力特性を併せ持つ薄板型X-cut LiNbO₃-MZ構造光変調器を提案し、設計、解析、試作、特性評価を行っている。特に結晶薄板平坦化技術と低誘電率支持膜作製技術、インピーダンス整合技術、電極作製技術などにおいて、優れた独創性を発揮しており、その成果は高く評価できる。第4章では、光導波路の設計と消光特性などを論じており、第5章では薄板構造の変調器の特性、特に薄板を支える低誘電率層の材料特性について、広範囲な探索と詳細な実験的検討を行っている。第6章では、変調器の諸特性について詳細に論じており、第7章では、実用規格の中で最も厳しいTelcordia試験規格を採り上げて、薄板型LiNbO₃光変調器の試験を行っている。

以上の検討結果として、変調帯域幅50GHz以上、変調速度43.5Gbps、駆動電圧2Vの特性を有し、安定した生産性と再現性を有する世界最高水準の光変調器を実現している。また、温度範囲-40° ~ 85° Cで20年間安定に動作することを検証している。第8章では、試作した光変調器の特徴とその応用を述べており、光通信用トランスポンダと76GHz通倍ミリ波発生器の試作例および今後の動向・見通しなどを述べている。第9章は結論である。

以上、本論文は次世代光通信のキーデバイスである超広帯域・低駆動電圧光変調器を考案・設計・試作評価した結果を纏めたものであり、得られた成果と知見は、光通信工学の分野において特に優れており、大きな波及効果を有している。よって本論文は博士(工学)を授与するにふさわしい論文であると認める。