

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14677

研究課題名(和文) マイクロ波・ミリ波帯アダプティブデバイス応用に向けた強誘電体薄膜移相器の開発

研究課題名(英文) Development of phase shifter with ferroelectric thin film for adaptive device in microwave or millimeter wave band

研究代表者

島 宏美 (Shima, Hiromi)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・電気情報学群
・講師

研究者番号：10610967

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：IoT時代の到来を背景にマイクロ波・ミリ波帯での可変多機能デバイスの開発が求められている。これまで印加電界によって誘電率が変化する液晶材料に着目したマイクロ波液晶装荷移相器が提案されていたが、本研究では、液晶装荷移相器の液晶層を強誘電体薄膜に置き換えた強誘電体薄膜移相器の開発を行った。高周波帯での応用を考え、チタン酸バリウムのBサイトにZrを置換したBZT膜を化学溶液堆積法により作製した際の構造解析や膜質、誘電特性の結果から、最適な成膜条件を検討した。その結果、より高い結晶化温度で熱処理することで結晶粒の成長が促され、高い比誘電率およびチューナビリティ特性が得られることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的な特色は主に2つある。まず、マイクロ波・ミリ波帯におけるアダプティブデバイスとして研究開発が進められてきた液晶装荷移相器の液晶層を、高速スイッチング可能な強誘電体薄膜におきかえることで、デバイスの小型化・高速化を狙った点である。次に、材料の選択から、デバイスの設計、素子の作製、評価までの全ての工程を1つの研究として行う点である。期待される成果として、産業的・工業的には小型化・高速化した新規アダプティブデバイスが実現することで、高速・大容量の移動体通信システムの普及が考えられる。

研究成果の概要(英文)：Since the arrival of the IoT era, the development of tunable multifunctional devices in the microwave and millimeter wave bands is required. We have proposed liquid crystal loaded phase shifter in microwave band, whose phase shifter operation is based on anisotropy in dielectric permittivity for the applied electric field. In this study, we are developing the ferroelectric thin film loaded phase shifter in which the liquid crystal layer is replaced with the ferroelectric thin film. In this report, for application in the RF band, optimum deposition condition of Ba(Zr,Ti)O₃ film in which Zr is substituted for the B site of BaTiO₃ were examined from the results of structural analysis, film quality and dielectric properties. As a result, it was confirmed that sintering at a higher temperature promotes growth of crystal grains, and high dielectric permittivity and tunability properties can be obtained.

研究分野：電子デバイス・電子機器

キーワード：マイクロ波・ミリ波 材料定数 強誘電体薄膜 自由空間法 移相器 高周波チューナブル素子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、無線通信の発展は目覚ましいものがあり、多くのサービスが様々な通信路を通して配信される状況になることが予想される。このような絶えず変化する無線環境や多様な伝送方式においてシームレスに所望の通信路を選択し、受信できるようなアダプティブ技術が重要となってくる。ベースバンドや IF(中間)周波数では、ソフトウェア無線技術により、アダプティブ技術を実現しているが、マイクロ波・ミリ波帯では、コンピューターの処理速度の限界から実現は難しい。そこで、マイクロ波・ミリ波帯のアダプティブ技術として、位相・周波数・振幅を変化させることが出来るデバイスを開発し、これらを制御する方法が研究されている。これらのデバイスの利用用途として、アダプティブアレイアンテナがある。これは、複数のアンテナを並列に配置し、各アンテナからの出力を合成することにより利得向上を図るアレイアンテナにおいて、状況に応じ、その指向性を変化させることが可能なアンテナのことである。フェーズドアレイアンテナシステムは給電位相の制御により、指向性を変化させることが可能で、可動部分がないことから、車、電車、航空機などの高速移動体における通信用アンテナシステムとして期待されている。中核デバイスは、電波の方向(位相)を制御する移相器である。しかしながら現在、実用化されている移相器は半導体を用いたものや機械式のもの为主で、非常に高価でサイズも大きい。その為、小型化、高性能化が求められている普及用の通信機器としての利用は難しいのが現状である。

アダプティブデバイスの開発に資する有効な材料として液晶に着目し、マイクロ波・ミリ波帯における液晶デバイスの開発が進められている。液晶材料の誘電率は 3~40 GHz においてほぼ一定で、損失も低く、その誘電率をバイアス電圧により容易に変化させることができる。液晶装荷移相器を用いたマイクロストリップアレイアンテナにおいて、30 V 電圧印加時に約 90 度の位相変化量が得られ、それにより 30 度ビームがチルトすることが報告されている。しかし一方で、液晶の応答特性が数百 ms~s オーダーと低速であることから、他の移相器に比べ位相変化に対する応答時間が極端に大きいことが短所としてあげられる。

2. 研究の目的

液晶装荷移相器の液晶層を強誘電体薄膜に置き換えることで、移相器の小型化・高速化が図れるのではないかと考え、強誘電体の中でも、外部電界に対して大きな誘電率変化(チューナブル特性)を有し、誘電損失が小さく、高い温度安定性を持つチタン酸ジルコン酸バリウム($\text{Ba}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$)を強誘電体薄膜材料として検討した。本研究ではマイクロ波・ミリ波帯におけるアダプティブアレイアンテナに使用する強誘電体薄膜移相器を開発するための諸検討を行う。これにより、新規の小型・高速、かつ普及型のフェーズドアレイアンテナシステムの構築が可能となり、大きな社会貢献が出来ると考えられる。

3. 研究の方法

強誘電体薄膜を用いた移相器の作製

強誘電体材料としては大きなチューナブル特性を有し、誘電損失が小さく、高い温度安定性を持つ $\text{Ba}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (BZT)を選択する。強誘電体 BZT 薄膜に関しては、既に Zr、Ti 組成比の異なる薄膜を反応性スパッタ法により作製しており、材料の性能指数を表す K-factor(Tunability/ $\tan\delta$ at 10 GHz)の値は、Zr=30 mol%以上の組成において、50 以上の値を示すことがわかっている。高周波用途として適した組成がある程度わかっていることから、Zr=30 mol%付近の組成を中心に作製し、最適な作製条件を確立する。また、強誘電体薄膜を電極付き基板(Pt/Si 基板)上に作製することにより、MSL 構造・CPW 構造移相器において下部電極の役割を果たすことから、作製・評価における手順の簡易化を狙った。しかし、強誘電体薄膜の特性は下部基板の格子定数や配向に強く依存することから、Pt/Si 基板上と単結晶基板上とは特性が異なる可能性がある。そのため、Pt/Si 基板上での薄膜の特性が上記の性能を満たさなかった場合、手順は煩雑になるが単結晶基板上に作製することで、高周波特性の改善を期待する。

高周波特性評価

高周波特性としては、強誘電体薄膜にバイアス電圧を印加しながら誘電率の変化を評価するチューナブル特性を中心に測定する。また、実際に作製した強誘電体薄膜を用いた MSL 構造・CPW 構造の移相器についても動作特性を評価し、シミュレーションとの比較を行う。実際の素子の形状になった場合に初めて明らかになる伝送損失などもここで評価する。

電磁界シミュレーター解析

電磁界シミュレーターは CST 社製の MW Studio を用いて解析を行う。強誘電体薄膜のチューナブル特性や高周波における誘電率、膜厚などのパラメーターを変化させながら色々なモデルで解析し、その結果を実際の素子の測定結果と比較することで、構造設計にフィードバックし、最適な素子の構造を明らかにする。また、強誘電体薄膜移相器を用いた 4 素子リニアアレイアンテナを設計し、ビームチルト角など動作特性について解析を行い、実用化の検討を行う。

4 . 研究成果

強誘電体薄膜材料としてペロブスカイト(ABO_3)構造を有するチタン酸バリウムの B サイトにジルコニウムを置換したチタン酸ジルコニウム酸バリウム(BZT)を選択した。薄膜の組成比や、成膜条件を確立するため、成膜方法として化学溶液堆積法を選択した。化学溶液堆積法により組成比及び結晶化温度の異なる BZT 膜を作製した。前駆体溶液の熱分析の結果より、成膜時の熱分解温度を 2 段階に設定し、有機物の残存量が少ない良質な膜を得ることに成功した。結晶化温度依存性の観点からは、構造解析や膜質、誘電特性の結果から、より高い結晶化温度で熱処理することで結晶粒の成長が促され、高い比誘電率およびチューナビリティ特性が得られることを確認した。ジルコニウム組成比依存性の観点からは、ジルコニウム置換量が 0.1 ~ 0.2 重量パーセント付近で比誘電率のチューナビリティ特性が最大となることを確認した。

マイクロ波・ミリ波領域での材料定数の評価手法として、誘電体レンズを利用した自由空間タイムドメイン法による S パラメータの測定方法について検討を行い、標準サンプルである石英基板、及びサファイア基板における比誘電率が文献値と概ね一致することを確認した。誘電率推定プログラムを作成し、標準サンプルでの測定、S パラメータからの誘電率推定を試みた。さらに、材料定数の評価に関しては、マイクロ波・ミリ波帯よりさらに高い周波数である光の周波数においても、分光エリプソメトリにより誘電率推定を試みた。

また、アダプティブデバイス開発をめざし、20 GHz 帯マイクロストリップパッチアンテナを用いた 4 素子リニアアレーアンテナの給電線路の設計に関する検討を行った。従来の給電方法では設計周波数以外の帯域における不要共振が生じていたが、給電線路に段階的なインピーダンス共振器を装荷することで、放射特性を劣化させることなく不要共振を抑制することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Shima Hiromi, Tsutsumi Koichi, Suzuki Michio, Tadokoro Toshiyasu, Naganuma Hiroshi, Okamura Soichiro, Kamei Toshihisa | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 Thermooptic properties of epitaxial BiFeO ₃ films with different orientations | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 11UF10 ~ 11UF10 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.7567/JJAP.57.11UF10 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 福田 翔太郎、河野 徹、島 宏美、亀井 利久 | 4. 巻 J101-C |
| 2. 論文標題 コプレーナ線路給電4素子リニアアレーアンテナの給電線路に関する検討 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C | 6. 最初と最後の頁 471 ~ 478 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 H. Shima, H. Uchida, T. Nakajima, S.Okamura, S. Fukuda, and T. Kamei |
| 2. 発表標題 Optimization of Deposition Conditions of Dielectric Ba(Zr,Ti)O ₃ Films for the Development of Phase Shifter in Microwave and Millimeter Wave Band |
| 3. 学会等名 2018 ISAF-FMA-AMF-AMEC-PFM Joint Conference (IFAAP2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 福田翔太郎、河野徹、宮田尚起、島宏美、亀井利久 |
| 2. 発表標題 コプレーナ線路給電マイクロストリップパッチアンテナの等価回路に関する研究 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会2019年ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 島宏美、一ノ瀬智浩、永沼博、亀井利久 |
| 2. 発表標題 高品質BiFeO ₃ 薄膜の光学特性における酸素流量の影響 |
| 3. 学会等名 2018年第79回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 鈴木仁哉、花澤理宏、島宏美、亀井利久 |
| 2. 発表標題 自由空間法を用いた電波吸収体の測定に関する一検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Nanchin Nandintugs、河野徹、宮田尚起、島宏美、亀井利久 |
| 2. 発表標題 屈曲部を有するコプレーナ線路の伝送特性に関する研究 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会「研究発表会」 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 福田翔太郎、ナンチン ナンディイントゥグス、河野徹、宮田尚起、島宏美、亀井利久 |
| 2. 発表標題 コプレーナ線路給電4素子リニアアレーアンテナの不要共振抑制のための給電線路に関する研究 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会「研究発表会」 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小野寛太、島宏美、亀井利久 |
| 2. 発表標題 Al2O3-ZrO2-SiO2系電鍍耐火物の電波吸収特性 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会「研究発表会」 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 池田龍介、島宏美、亀井利久 |
| 2. 発表標題 自動車塗装用金属皮膜におけるミリ波透過特性の評価 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会「研究発表会」 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 島田隼佑、島宏美、亀井利久 |
| 2. 発表標題 多孔質炭素粉末含有ゴムシートの電波吸収に関する研究 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会「研究発表会」 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 ナンチン ナンディイントゥグス、河野徹、宮田尚起、島宏美、亀井利久 |
| 2. 発表標題 屈曲させたコプレーナ線路の伝送特性の比較 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会「研究発表会」 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 福田 翔太郎、亀井 利久、河野 徹、島 宏美 |
| 2. 発表標題 プレーナ線路端部スロット給電4素子リニアアレーアンテナの給電線路に関する検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会2017年ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 島 宏美、内田 寛、中嶋 宇史、岡村 総一郎、福田 翔太郎、亀井 利久 |
| 2. 発表標題 マイクロ波・ミリ波帯移相器の開発に向けた強誘電体膜材料の検討～成膜条件の最適化～ |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 福田 翔太郎、亀井 利久、河野 徹、島 宏美 |
| 2. 発表標題 コプレーナ線路端部スロット給電4素子リニアアレーアンテナの給電線路に関する検討その2 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 福田 翔太郎、亀井 利久、河野 徹、島 宏美 |
| 2. 発表標題 コプレーナ線路給電4素子リニアアレーアンテナの背面放射抑制に関する検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会2018年総合大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|