

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26390107

研究課題名（和文）サブ波長構造を有する液晶準光学素子によるミリ波ビームの広角走査デバイスの開発

研究課題名（英文）Development of wide scanning angle for millimeter wave beam by liquid crystal quasi-optical device with subwavelength structure

研究代表者

田中 将樹（TANAKA, Masaki）

秋田工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：60353231

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：ミリ波は車載レーダなどに利用され、センシングの分野において有望とされている。ミリ波を使った車載レーダでは物体などを検知するにはミリ波を走査させる必要があり、走査機構として一般的に使われている機械的走査ではコストやスペース等の問題がある。本研究では、ミリ波で比較的大きな電気光学効果を有する液晶に着目し、ミリ波を電氣的に偏向可能な偏向素子の作製を目的として液晶と誘電体を交互に積み重ねたサブ波長周期の液晶・誘電体多層構造を提案し、ミリ波偏向の可能性について調べた。

研究成果の概要（英文）：Millimeter wave has been applied to the automotive radar and full-body scanner in the field of sensing. However, mechanical scanning which is generally used as a scanning system of the millimeter wave has problems such as cost and space. Liquid crystal materials that have dielectric anisotropy and large electro-optical effects, are candidates for microwave and millimeter-wave modulation devices. In this study, we proposed a liquid crystal / dielectric multilayer structure in which liquid crystals and dielectrics are alternately stacked. Millimeter-wave deflection properties are calculated and estimated for design of the millimeter-wave deflection devices.

研究分野：電子工学

キーワード：液晶 ミリ波

1. 研究開始当初の背景

身近な移動手段として普及している自動車は、交通事故の死亡者減少に向けて現在“予防安全技術”が精力的に取り組まれており、車載レーダやカメラを利用した様々なシステムが実用化されてきている。現在開発が進められている 70GHz 帯のミリ波技術は、「ミリ波車載レーダ」以外にも、「ミリ波車車間通信」やインフラ協調型のシステムとしての「交差点監視用ミリ波センサ」などがあり、交通事故のない社会を目指してミリ波技術の普及が進んでいる。また、セキュリティの分野においてもより高度な“安全安心な技術”が求められ、空港の「ミリ波不審物探査装置」などのミリ波イメージングが実用化され始めている。これら社会安全のためのレーダ・センシング技術は一部実用化されているが、ミリ波センシング装置の高感度・高解像度化及び低消費電力、低コスト化に対する要求が高く、構成する素子の構造や材料の開発は急務となっている。

上述のミリ波センシング装置に欠かせないミリ波の走査機構のほとんどは機械的駆動が採用されているが、本研究は機械的な駆動機構を伴わずに電気的にミリ波の偏向特性を制御する装置の開発を目的とした。すなわち、液晶を利用したミリ波偏向素子を提案して、電気的に同調可能で広角にミリ波の伝搬方向を位置制御する技術の確立を目指した。

これまで光学的な手法を援用した変調制御可能な準光学的ミリ波デバイスの創製を目的として、液晶材料を用いたミリ波デバイスの研究を行ってきた。その研究において、デバイスの小型化、低コスト化、低消費電力等の特徴を有する薄型ディスプレイの分野で利用されている液晶は、ミリ波領域においても大きな電気光学効果を有していることを確認し、液晶の分子配向効果に基づく複屈折効果によりミリ波の特性を制御可能な帯域フィルタや液晶プリズム(図1)、液晶レンズ等の作製を行ってきた。

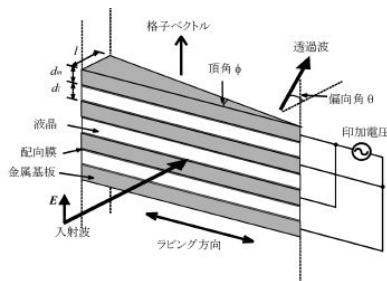


図1 液晶プリズム

図1の液晶プリズムで得られた液晶の分子配向効果に基づく複屈折効果による偏向角の変化は約 4°程度であった。プリズム型では素子がプリズムの形状であるため、得られる偏向角が小さい、電圧がオフ状態でも偏向している等の短所がある。そこで本研究で

は、これまでの液晶プリズムの特性改善を目指して大きな偏向角を得ることを目的に、新規な構造としてサブ波長構造を利用した液晶偏向素子を提案して検討を行い、ミリ波を電気的に且つ広角に走査可能な偏向素子を設計し、液晶を用いることによりミリ波センサを高機能化させることを目指した。構造として液晶と誘電体を交互に積層し、液晶の占有率 f に勾配を与えたサブ波長構造による液晶回折光学素子(図2)を提案した。提案する素子は、液晶の分子配向効果に基づく複屈折効果を利用して連続的にミリ波ビームの偏向角を変化させることが期待でき、これによりミリ波センサの広角走査機能の実現を目指した。

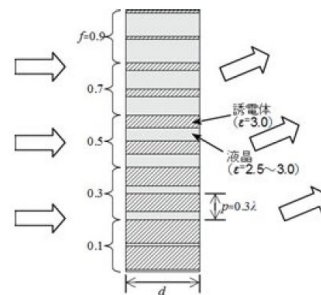


図2 液晶回折光学素子

2. 研究の目的

本研究は、液晶を利用することでミリ波ビームを電気的に且つ広角に走査可能な偏向素子を設計し、液晶による 70GHz 帯ミリ波レーダやミリ波の走査装置の高機能化および小型化、低コスト化を目指すことを目的として、次世代インフラ技術として有望なミリ波レーダやミリ波の走査装置等のミリ波センシングシステムの課題である電気的な走査機構およびコスト面での解決を試みた。本研究の特徴である準光学的技術を利用したサブ波長構造によるミリ波帯液晶偏向素子を提案し、液晶の分子配向効果に基づく複屈折効果により、ミリ波の電気的な走査機能の実現を目指した。

3. 研究の方法

(1) 本研究で提案した液晶・誘電体多層構造のモデルを図3に示す。液晶層と誘電体層を交互に並べた周期構造をしている。モデルのパラメータは、構造の長さ d 、液晶の比誘電率 ϵ_{LC} 、誘電体の比誘電率 ϵ_d 、液晶層の厚さ w_{LC} 、誘電体層の厚さ w_d 、液晶の占有率 f となっている。液晶の占有率 f は次式によって表される。

$$f = \frac{w_{LC}}{w_{LC} + w_d}$$

本モデルでは液晶層の厚さあるいは誘電体層の厚さのいずれかを一定とし、液晶の占有率 f を 0.5 ~ 0.25 の範囲で 2~5 段階に変化させ、勾配を与えている。この占有率の勾

配により、構造を通過するミリ波が偏向することになる。

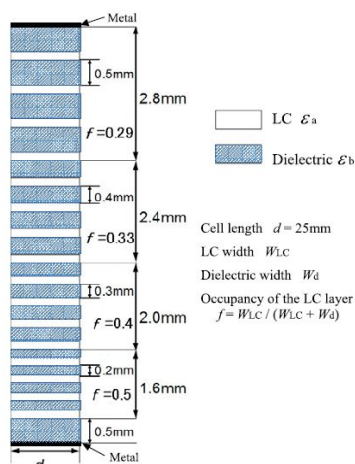


図3 液晶・誘電体多層構造のモデル

(2) 提案した液晶・誘電体多層構造は、ミリ波の波長以下の周期構造を有していることから、有効媒質理論により一様な媒質に近似できる。有効媒質理論とは、積層方向に波長以下の周期構造をもつ誘電体を一様な媒質として見做す理論のことである。この理論によって近似された誘電率は等価誘電率と呼ばれ、格子構造の周期や形成する誘電体の比誘電率等で決まる。そこで始めに、多層構造モデルを有効媒質理論によって等価誘電率で近似し、構造を通過するミリ波の偏向角度を計算した。

(3) 有効媒質理論による偏向角度の見積りを行った後、より厳密な計算を行うために、Maxwell 方程式を空間的・時間的に差分化し、電磁場を計算する有限差分時間領域(FDTD)法による解析を行った。図4にFDTD法による解析モデルを示す。ミリ波の励振はTEモードのガウジアンパルスでその中心波長 λ を3.3mm(約90GHz)とし、励振位置から約 1λ 離れた位置に多層構造セルを設置した。その幅に相当する励振波をセルに対して垂直に入射させ、セルから 12λ 離れた観測線における強度分布を計算した。計算結果は高速フーリエ変換によって、観測線上の座標1~4001における周波数 $f = 75\text{GHz} \sim 95\text{GHz}$ のミリ波強度として求めた。

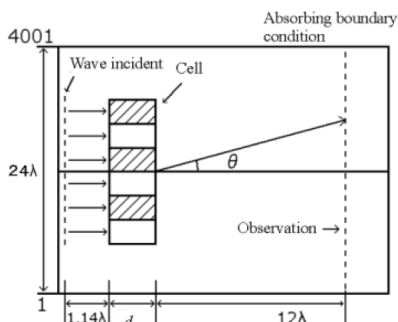


図4 FDTD 解析モデル

また、セルサイズは $\Delta x = \Delta y = 20 \mu\text{m}$ 、解析時間ステップは $\Delta t = 1.52 \times 10^{-9}\text{s}$ とし、解析領域の4辺の境界面にMurの1次吸収境界条件を適用させた。

(4) 提案した液晶・誘電体多層構造によるミリ波偏向素子を設計し製作を試みた。誘電体としてカバーガラスを採用し、液晶層の厚さを $200\mu\text{m}$ 一定とし、使用するカバーガラスを、4層ごとに厚さが $200\mu\text{m}$ から $500\mu\text{m}$ まで $100\mu\text{m}$ 刻みで変えることにより、液晶層の占有率を0.5から0.29まで変化させた。液晶材料として5CB(4-Cyano-4'-pentylbiphenyl)、配向膜としてPVA(polyvinyl alcohol)を用い、ラビング処理によりホモジニアス配向とした。

4. 研究成果

(1) 始めに有効媒質理論による等価誘電率近似を用いた方法で、提案した多層構造の偏向角度の見積りを行った。液晶層の厚みを $200\mu\text{m}$ 一定とし、誘電体の厚みを5段階に変化させた構造に対して、誘電体の比誘電率を変化させた時の偏向角度を計算した結果を図5に示す。偏向角度 θ はミリ波周波数が高いほど大きくなり、誘電体の比誘電率が增大するに伴って大きくなっていることが分かる。90GHzのミリ波に対し、約 5.70° 、50GHzのミリ波に対し約 5.44° の偏向角度差が得られることが分かった。

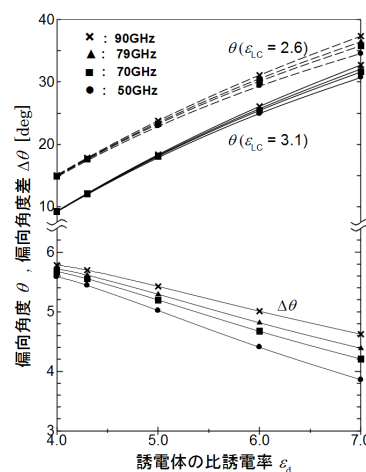
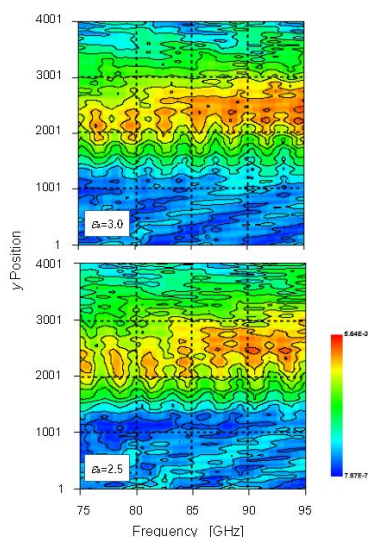


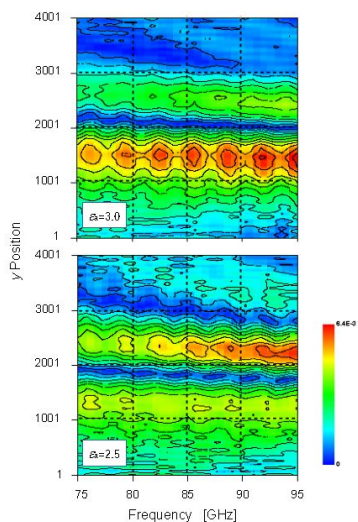
図5 有効媒質理論による計算結果(TM波)

(2) より詳細に解析を行うために、有限差分時間領域(FDTD)法を用いて、液晶層あるいは誘電体層の厚みを2および4段階に変化させた多層構造について計算を行った。図6(a)に液晶層の厚みを $200\mu\text{m}$ 一定とし、誘電体の厚みを $200\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$ と4段階に変化させた構造の解析結果を示す。液晶層の比誘電率を3.0および2.5とした場合の観測線上のミリ波強度分布の周波数特性である。どちらの場合も図より観測位置が2000~3000の間で最も強度が高いことから、ミリ波が多層構造を通過して、 $+\theta$ 方向に偏向し

ていることがわかる。また、低い周波数では 2000 ~ 2500 の範囲が最も強度が高いが、高い周波数では 2000 ~ 3000 の範囲で全体的に高くなっている。また、液晶層の比誘電率が 3.0 の場合（上図）では強度の極大を示す位置が中心（ $y = 2001$ ）付近にあるが、比誘電率が 2.5 の場合（下図）では特に 90GHz 付近で極大を示す位置が中心より離れており、液晶の誘電率の変化によりミリ波の分布が $+\theta$ 側にシフトしていることがわかる。



(a) 液晶層厚み一定、誘電体層厚み 4 段階変化させたセル



(b) 誘電体層厚み一定、液晶層厚み 2 段階変化させたセル

図 6 観測地点の周波数特性

図 6 (b) に誘電体層の厚みを $200\mu\text{m}$ 一定とし、液晶の厚みを $200\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ と 2 段階に変化させた構造の解析結果を示す。液晶層の比誘電率が 3.0 の場合（上図）と 2.5 の場合（下図）で比較すると強度の極大を示す位置が $-\theta$ 方向から $+\theta$ 方向に変化しており、

偏向方向が大きく変化している様子が見られた。今後はこの構造に対して液晶層の厚みや液晶セルの長さ等の最適値についてさらに検討を進める予定である。

また、解析結果を元にセルの設計を行い、サブ波長構造の多層構造液晶セルを作製してミリ波の偏向特性の測定を試みた。しかしながら、液晶への電圧印加によるミリ波偏向への影響が小さく期待していた結果が得られなかった。解析結果をもとにセル構造および電極構造・材料について設計の見直しを行い、引き続きセルの作製および測定を行っている。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 9 件)

田中 将樹, 高橋 源, 菅原 星矢: 「FDTD 法による液晶・誘電体多層構造を有するミリ波偏向素子の設計」, 第 6 4 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 14 日 ~ 17 日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

菅原 星矢, 田中 将樹: 「多層構造を用いた液晶偏向素子のミリ波偏向特性」, 第 22 回高専シンポジウム in Mie, 2017 年 1 月 28 日, 鳥羽商船高等専門学校(三重県・鳥羽市)

田中 将樹, 菅原 星矢: 「サブ波長周期に配列した誘電体によるミリ波フォトニック結晶の設計」, 第 22 回高専シンポジウム in Mie, 2017 年 1 月 28 日, 鳥羽商船高等専門学校(三重県・鳥羽市)

菅原 星矢, 田中 将樹: 「液晶・誘電体多層構造のミリ波透過特性」, 平成 28 年度東北地区高等専門学校専攻科産学連携シンポジウム, 2016 年 11 月 26 日 ~ 27 日, 仙台高等専門学校 広瀬キャンパス(宮城県・仙台市)

田中 将樹, 手塚 大貴: 「屈折率分布を持つ不均一媒体の光線追跡シミュレーション」, 第 21 回高専シンポジウム in 香川, 2016 年 1 月 23 日, 丸亀市民会館, 丸亀市生涯学習センター(香川県・丸亀市)

手塚 大貴, 田中 将樹: 「液晶・誘電体多層構造によるミリ波帯偏向素子の設計」, 第 21 回高専シンポジウム in 香川, 2016 年 1 月 23 日, 丸亀市民会館, 丸亀市生涯学習センター(香川県・丸亀市)

手塚 大貴, 田中 将樹, 中村 剣登, 河村 希典, 佐藤 進: 「屈折率分布を

有する液晶マイクロレンズの光線追跡シミュレーション」,平成27年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」,2015年2月28日,日本大学(福島県・郡山市)

手塚 大貴,田中 将樹,中村 剣登,河村 希典,佐藤 進:「光線追跡法による液晶マイクロレンズの光偏向特性の解析」,平成26年度東北地区高等専門学校専攻科産学連携シンポジウム,2014年11月29日~30日,仙台高等専門学校(宮城県・仙台市)

手塚 大貴,田中 将樹,中村 剣登,河村 希典,佐藤 進:「光線追跡法による屈折率分布を有する液晶マイクロレンズの解析」,2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会,2014年9月17日~20日,北海道大学(北海道・札幌市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 将樹(TANAKA, Masaki)

秋田工業高等専門学校・創造システム工学
科・准教授

研究者番号: 60353231

(2)連携研究者

河村 希典(KAWAMURA, Marenori)

秋田大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 90312694

伊藤 桂一(ITO, Keiichi)

秋田工業高等専門学校・創造システム工学
科・准教授

研究者番号: 20290702

(3)研究協力者

佐藤 進(Susumu Sato)

秋田大学・名誉教授