

光照射によって生成されるコプレーナ導波路上のミリ波反射境界の基礎特性

能勢敏明¹, 猪野陽聖¹, 真坂護², 伊藤謙二², 伊東良太¹, 本間道則¹¹ 秋田県立大学システム科学技術学部知能メカトロニクス学科² 由利工業株式会社

次世代の通信方式である 5G が最近大きな注目を浴びている。超高速な通信速度に加えて、遅延時間が非常に短い特徴によってリアルタイムのロボット操作が可能となり、遠隔地での手術ロボットや危険な場所での重機の遠隔操作等への期待が高まっている。さらに、多数同時接続が可能になる点も大きな特徴であり、センサーネットワーク応用等のスマート農業実現に不可欠な基盤技術として期待されている。すなわち、通信技術の進歩に伴うビジネスの展開分野として、これまでの携帯電話やスマートフォンだけではなく、自動車、医療、農業、小売等の様々な分野への新しい展開が期待できるようになる点が、これまでの通信方式の世代交代と大きく異なる点である。このような状況の中で、前述の高い無線通信性能を実現するために、これまであまり利用が進んでいないミリ波帯の利用も大きな期待を集め、民間でのミリ波利用が本格的に進む可能性も出てきた。従って、スイッチング速度では半導体に劣るもののコスト面では極めて有利になる可能性がある、液晶材料の活躍も大いに期待できるものと考えられる。このような考えから、筆者らはこれまで平板回路型および準光学的なアプローチによる様々な液晶ミリ波制御デバイスの検討を行っている。しかし、最終的なデバイス性能を決める液晶材料はディスプレイ応用に開発されたものを流用せざるを得ないため、ミリ波帯において優れた液晶材料の知見はまだ不足している。そこで、できるだけ少量でミリ波帯の液晶材料の屈折率と損失を測定する優れた測定法の開発は、この分野における大きな課題である。これまで、コプレーナ導波路上に電氣的ショートとして働く金属板を挿入したカットバック法による液晶測定法を検討してきたが、機械的接触を伴う金属板の使用は本来好ましくはない。そこで本研究では、コプレーナ導波路の誘電体基板として Si 半導体を用い、光電効果によって生じるキャリアによって形成される低抵抗ドメインをミリ波の反射境界として金属板の代わりに用いる手法の開発を目指し、その基礎的な検討を行った。

キーワード：液晶，ミリ波，光電効果，コプレーナ導波路，複素屈折率の測定

1990 年代に 2G 規格と呼ばれるデジタルの通信方式が導入されてから、携帯電話が一般の人にも身近になり、その普及も急速に進み始めた。2000 年頃には 3G システムに進歩し、携帯電話は単なる音声通話機器ではなくカメラ撮影やインターネットを利用する機能も持ち始めた。そして、2010 年以降の 4G システムの導入と共にスマートフォンが主流となり、もはや小型 PC と言ってよいほど高機能な情報端末へと大きく進化している。端末数が益々増加すると共に動画などの利用も進み、無線通信に要求される通信速度はここ 30 年で 1 万倍に増加している。このような通信量の急激な増加に伴って、使用可能な電

波の周波数領域が常にひっ迫する状況が続く、近い将来の周波数帯の枯渇が心配され続けている。すなわち、無線技術の進歩が新しいサービス・消費を生み電波の不足を益々加速する状況が続いている。したがって、いよいよこれまであまり利用されて来なかったより高い周波数帯の利用技術の開発が要求されるようになって来た。さらに最近では、2020 年頃の実用化を目指して、次世代の通信方式である 5G が注目を浴びている。これは、更なる通信速度の向上のみならず、遅延時間が非常に短い点が大きな特徴であり、遠隔地にある機器のリアルタイムでの操作が可能になる為、例えば遠隔地の医療ロボットや

危険な現場にある重機の遠隔操作の実用化等が期待されている。また、非常に多くの機器との同時接続が可能となる点もこれまでの方式には無い特徴の一つであり、スマート農業等で期待されているセンサーネットワーク構築に極めて優位になる。まさに、IoT技術の根幹を支える重要な技術の一つと言える。これらの新しい機能は、自動運転などの技術革新が進む自動車分野、スマート農業を模索する農業分野、遠隔地医療の問題を抱える医療分野など、従来の携帯電話・端末のみのビジネス領域を超えて、極めて広い範囲における新しいビジネスの展開が期待されている。

以上に示したような 5G システムにおける異次元の技術革新を実現し、しかも枯渇が心配されている電波の周波数資源の確保のために、これまで未開拓のまま残されている、より高い周波数帯域であるミリ波の利用が現実的になっている。これまでは、衝突防止用の車載レーダーや空港のセキュリティー検査装置等への応用が主であったが、ICT を支える基盤技術としての位置付けが極めて重要になりつつある。電波の中でも特に周波数の高いミリ波帯では、光波のような直進性が強く現れ、小型のアンテナで細いビーム状にして必要な相手だけに電波を送信できるため、省エネ化した使い方が容易になると共に情報セキュリティーの点でも有利になると考えられる。今後 5G への通信方式への世代交代が進み、我々の身近な所でミリ波の利用が進めば、ミリ波の伝搬を操る扱い易い制御デバイスが極めて重要になってくる事が予想される。

ところで、優れた電気光学材料として広く知られている液晶材料が、フラットパネルディスプレイとして輝かしい応用実績を持つ事は周知の事実である。有機 EL の台頭が急速に進んでおり将来の主役の座は不透明な部分もあるが、フラットパネルディスプレイ分野での液晶の活躍はこれからも続くものと思われる。また、一般にはあまり知られていないが、焦点可変レンズや空間光変調器などのアクティブな光学素子としての応用も進められている。このように光波領域での応用のみが注目されている液晶材料であるが、広い電磁波スペクトル領域で眺めてみると、電波に近いミリ波・THz 波領域でも大きな複屈

折を持ち、この帯域でも電子的な制御デバイスを実現するために有用な材料である事が次第に明らかになっている。すなわち、液晶材料を用いて小型軽量で低駆動電圧を特徴とするミリ波帯における扱い易い制御デバイスの実現が期待できる。このような考えから、液晶を用いたマイクロ波やミリ波の位相変調器等がいくつか提案されており (Ito et al, 2012)

(Nose et al, 2013) (能勢ら, 2015, 2016, 2017)、最近ではアンテナや電子回路を一体化した液晶アンテナも実用化されている。(シャープ, 2015) 近い将来の 5G 実用化に伴うミリ波の民間利用に向けて、応答速度が多少遅くても安価で扱い易いデバイスへの要求が高まる事が予想されているものと思われる。

しかし、現状で用いる事が出来る液晶材料は、ディスプレイ応用に開発された材料に限られ、ミリ波帯での性質は通常は分っていない。従って、デバイスの設計や動作の評価で不可欠となる、使用周波数帯での屈折率や損失のデータを正確に測定する方法は極めて重要である。特に液晶材料の評価においては、異方性の評価が重要である為、分子配向方向を制御した特殊な測定方法の開発が必要となる。基本的には、ミリ波が良好に伝搬する何らかの導波路に液晶材料を導入した時の透過ミリ波の位相と振幅の変化をベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて測定する方法が最も簡単である。これまで、導波管を用いた方法 (Nose et al, 2005)、平板回路として広く使われているコプレーナ導波路 (CPW) を使った手法 (Ito et al, 2011) が開発されている。これらは、いずれもミリ波を反射する可動反射板を持つ反射型の測定セルである。反射板を移動してミリ波が伝搬する液晶の長さを変化させながら測定を行い、その差分を抽出する事によって液晶部分のみによる影響を高精度に測定する方法である。カットバック法としてマイクロ波の測定技術の一つとして良く知られた方法を導入したものである。CPW を利用した場合、導波管より遙かに少ない量で測定が可能になるが、可動反射板がセル基板表面と機械的な接触を伴い、分子配向処理が重要な液晶の測定において一度の測定で配向処理が破壊されてしまうため、測定セルの複数回の使用は困難となる。

ところで、Si ウェハに光を照射した時に発生する

キャリアが良好なサブミリ波の反射効果を示す事が知られている。(荏戸ら, 1997 年)そこで本研究では, CPW の誘電体基板として半導体材料を用いる事により, 強い光照射によって高密度のキャリアが発生する領域を作り, ミリ波の反射境界として利用しようとするものである. ここでは半絶縁性の Si 基板を用い, 波長 905nm の半導体レーザーをパルス駆動し, 更にレンズで集光する事によって高密度のキャリアの発生を試み, その基礎的な検討を行った. 反射ミリ波の観測条件を最適化し, 照射位置の移動による反射波の変化から Si 基板自体の屈折率や損失の評価の可能性を検討した.

光照射による反射ミリ波の観測

測定システムと測定原理

図 1 に, CPW を用いて光照射によるキャリア生成を行い, ミリ波の反射特性を観測する実験装置の概要を示す. 信号源として用いたガンダイオード (40GHz)からのミリ波は, サーキュレータを通った後にプローブを介して CPW に給電されている. さらに, CPW からの反射ミリ波をサーキュレータを用いてダイオード検出器に導き, オシロスコープで強度変化の観測を行った. 図には示されていないが, CPW の上部に半導体レーザー(905nm)が設置されており, ピーク強度 200W でパルス幅 100nsec の出力光がスポット径約 1.5mm φ に照射されている.

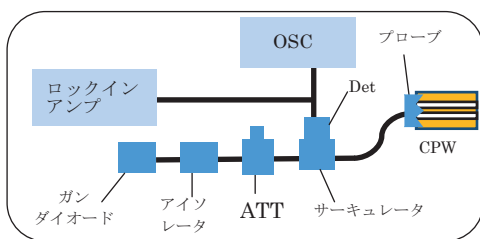


図 1 測定システムの概要

図 2 に, CPW 上でのミリ波の反射の様子を示す. CPW の誘電体基板として半絶縁性の Si 半導体を用いており, そのままの状態では良好なミリ波導波路として動作する. ガンダイオードからのミリ波はプローブを介して導波路の左端に給電された後に右方

向へ伝搬し, 光照射が無い場合は右端が反射面となりほぼ全てのミリ波が反射される. 一方, 半導体レーザー光を導波路の一部に照射した場合, 光電効果によって高密度のキャリアが発生する. そのキャリアは直ちに拡散する事から, キャリヤ密度が高い間だけミリ波の反射が起こると考えられ, 時間的に変化する反射ミリ波の強度をオシロスコープで観察した.

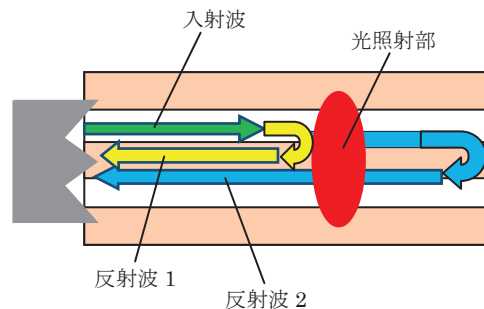


図 2 Si 基板を用いて作製した CPW による光照射の実験の様子

図 3 に, オシロスコープで観察されるミリ波の反射波形の様子を示す. 光パルス照射のタイミングに合わせて反射ミリ波強度の周期的なディップ波形が観測される. 反射波強度は 50 μ sec 程度で元に戻るが, 光パルス幅はそれより遙かに狭い事から生成キャリアの再結合と拡散のプロセスにおける反射ミリ波強度の減衰が見えているものと思われる. 光照射によって生成した反射境界の反射率は 100%にはならない為, 一部が透過した後に CPW 右端から反射して入力側へ戻り, 光反射境界からの反射波と干渉した結果が観測されているものと考えられる. 従って, ディップ波形は半導体レーザーの光照射によって出現した波との干渉による効果が表れており, ベ

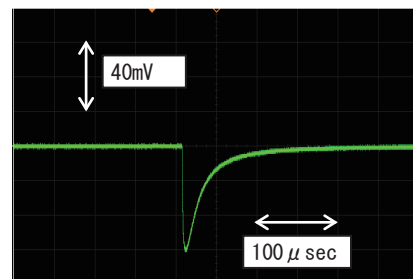


図 3 オシロスコープによる反射ミリ波強度の時間変化波形

ースラインは右端からの反射波だけが観測されている部分である。

反射波の考察

図4は、光照射位置を導波路に沿って移動させながら図3に示したディップ波形の最小値をプロットした結果である。横軸はプローブから光照射位置までの距離を示しており、この値の2倍がミリ波の伝搬長に相当する事になる。光反射境界からの反射波の伝搬長が光照射位置によって変化する為、反射波同士の干渉によって現れるディップの値は、両者の伝搬長の差が波長の整数倍になる毎に強弱を繰り返す事になる。原理的には、この周期を観測すればCPW上での波長が求められ、それを用いて導波路の実効屈折率を導出する事ができる。図4の結果を見ると、伝搬長の短い左側のプローブに近い部分のみに周期的な変化が観測された。Si基板もある程度の損失を持っているため伝搬長が長くなるとミリ波の減衰によって干渉効果の観測が難しくなるものと思われる。

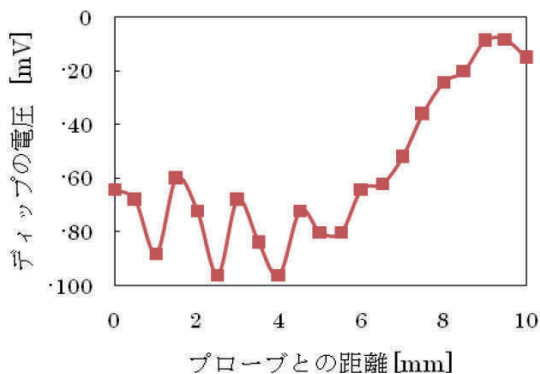


図4 オシロスコープのディップ波形における最小値の光照射位置による変化特性

Si 誘電体基板の評価

屈折率および損失の評価

屈折率の評価には、図3に示したディップ波形の最小値の周期的な変化だけが必要である。そこで、オシロスコープによる波形観察に代わって、光照射パルスの周期を参照信号としてロックインアンプによる測定を行った結果を図5に示す。

ロックインアンプは、光照射による信号変化の大

さを測定するため、オシロスコープによるディップ波形の観測結果と反転した変化特性となるが、その周期的変化は完全に重なっている。そこで、この周期を適当な特徴点に注目して複数読み取りその平均値を用いてミリ波のCPW上での実効的波長として抽出した。その結果を表1に示す。測定から求められたSi基板の屈折率は、文献値に比べると小さな値になっている。誘電率に換算すると文献値のほぼ半分の値になっている。これは、CPWを伝搬するミリ波が空気とSi基板の誘電率の平均を感じている事を考慮すると妥当な値が得られているものと思われる。

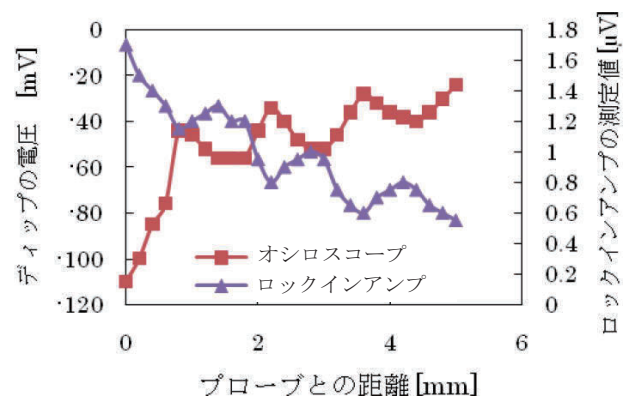


図5 ロックインアンプを用いた信号計測

表1 屈折率の評価

	オシロスコープ	ロックインアンプ	文献値
λ_g	2.77	2.70	
n_{eff}	2.71	2.78	3.6
ϵ_r	7.34	7.73	13

表2 損失の評価

	オシロスコープ	ロックインアンプ	文献値
α (mm^{-1})	0.079	0.103	0.011

次に、周期的な波形が徐々に小さくなる強度の変化は導波路の損失を反映したものである事から、その減衰がランベルト・ベールの法則に従う事を仮定して吸収係数の導出を行った。それらの評価結果を

表 2 に示す。文献値に比べるとかなり大きな値が見積もられている。Si ウェハの個体差によるものか、測定法の本質的な問題か現時点では区別がつかない。損失がそれほど大きくない材料の損失を正確に測る必要があるため、今後新たな工夫が必要になるものと思われる。

まとめ

ミリ波帯における屈折率と損失を評価する新しい測定手法の開発を目指して、Si 半導体ウェハを誘電体基板として用いた CPW を作製し、光照射によって生成するキャリアによるミリ波反射特性を調べた。パルス光照射の周期に対応したミリ波の反射パルスが観測され、照射位置を変化させてミリ波の伝搬長を変えると周期的な変化が観測された。ミリ波強度の周期的な変化および減衰の度合いから、それぞれ Si 導波路の屈折率および損失をおよそ見積もることができる事を確認した。

謝辞

本研究の一部は、学長プロジェクト「ユーラス研究助成」の補助により行われた。また、測定は平成 25 年度 SCOPE 事業により整備した測定装置を利用した。さらに、光キャリアを用いたミリ波反射技術に関する相談を頂いた名古屋工業大学ペイ教授に心より感謝致します。

文献

Ryouta Ito, Takayuki Kawakami, Yusuke Ito, Takayuki Sasamori, Yoji Isota, Michinori Honma, and Toshiaki Nose (2012). Fundamental Properties of Novel Design Microstrip Line Type of Liquid Crystal Phase Shifter in Microwave Region. *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 044104.

Toshiaki Nose, Liang-Chy Chien, Otilia Catanescu, Andrii Golvin, Yusuke Ito, Takayuki Sasamori, Yoji Isota, Ryouta Ito, and Michinori Honma (2013). Improved High-Frequency Performance of

Microstrip-Line-Type Liquid Crystal Phase Shifter. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 091701.

能勢敏明, 永澤雅, 渡辺猛, 伊藤謙二, 伊東良太, 本間道則(2015)「n 形液晶を用いたミリ波位相変調器の検討」『秋田県立大学ウェブジャーナル, B』, 2, 194-198.

能勢敏明, 永澤雅, 真坂護, 伊藤謙二, 伊東良太, 本間道則(2016)「液晶ミリ波位相変調器を組み合わせたツインアレイアンテナシステムの基礎特性」『秋田県立大学ウェブジャーナル, B』, 3, 167-173.

能勢敏明, 鏡太朗, 真坂護, 伊藤謙二, 伊東良太, 本間道則 (2017)「3D プリンタによるミリ波用液晶フレネルレンズの検討」『秋田県立大学ウェブジャーナル, B』, Vol.4, 113-118.

シャープ株式会社, News Release 「米国・カイメタ社と衛星通信向けアンテナを共同開発」

<http://www.sharp.co.jp/corporate/news/150819-a.pdf>

Toshiaki Nose, Michinori Honma, Tatsuo Nozokido, and Koji Mizuno (2005). Simple method for the determination of refractive indices and loss parameters for liquid-crystal materials in the millimeter-wave region. *Applied Optics*, Vol.44, 1150-1155.

Ryota Ito, Susumu Yanagihara, Kenji Ito, Takeshi Watanabe, Toshiaki Nose, and Michinori Honma (2011). Basic Performance of Refractive Index Measurement Method for LC Materials in Super High Frequency Region by Using Coplanar Wave Guide. *MCLC*, Vol.543, 92-100.

荻戸立夫, 南出泰亜, 水野皓司(1997)「光照射半導体基板を用いたサブミリ波変調法」『電子情報通信学会論文誌』, C- I , J80-C-1, 259-266.

〔平成 30 年 6 月 30 日受付〕
〔平成 30 年 7 月 10 日受理〕

Fundamental Properties of Millimeter-Wave Reflection Boundary Induced on Coplanar Waveguide by Light Irradiation

Toshiaki Nose¹, Yosei Ino¹, Mamoru Masaka², Kenji Ito²,
Ryota Ito¹, and Michinori Honma¹

¹ *Department of Intelligent Mechatronics, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

² *Yurikogyo Co. Ltd.*

The next generation high speed wireless communication system entitled 5G is now attracting much attention. 5G brings together the potential of minimal delay time, immense connectivity, and extremely high-speed communication. Its application is also expected to expand to fields beyond mobile telephony. Actually, high performance wireless communication is very important to the development of autopilot systems for automobiles. Also, in medicine, remote manipulation robots controlled by expert doctors are expected to assist in surgeries. Massive connectivity is the key to the construction of large sensor networks that are vital for smart agriculture. Millimeter-waves (MMW), which have remained unexplored for a long duration, are now attracting attention in the creation of extremely high performance of 5G systems. Since the MMW shows a strong directionality, it is advantageous for effective communication methods as it can assist in energy saving and lower cross talk by using small antenna. However, some kind of device to regulate MMW propagation is mandatory to actually obtain the desired performance. It is also believed that liquid crystal (LC) materials are prime candidates for attaining such MMW control devices because it has recently been discovered that LCs generally have similarly large birefringence for MMWs as they possess for visible rays. However, the birefringence and loss properties of LC materials are known for only a small number of the substances, and the development of a superior measurement method for LCs is an urgent task with regard to their use for MMWs. The authors have developed a novel measurement method for LCs by using CPW, which utilizes a moving metal to reflect the propagation of MMWs. This paper investigates the reflection properties of MMWs through the photo generation carriers on a CPW fabricated using semi-insulating Si wafers to utilize the MMW reflection boundary as a noncontact electric short.

Keywords: liquid crystal, millimeter wave, photo carrier, CPW, refractive index measurement