

300 GHz～1 THz 帯に向けた広帯域電界分布撮像システムの開発

代表研究者

岡田 竜馬

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 助教

1 緒論

100 GHz を超える THz 帯では、THz 波の透過性・直進性を利用して、非破壊検査、食品検査、医薬品検査、がん検診といった医療応用、セキュリティ等の利用が検討されている[1]。さらに、Beyond 5G, 6G (B5G/6G) ではこれらの周波数を用いて、超高速・大容量通信が検討されている[2]。その B5G/6G 向け関連デバイスや回路の高周波電界計測の重要性が増している。特に、THz 波の直進性を生かして通信の到達距離や品質を向上させるために、極めて高い指向性を有する細いビームを高速かつ高精度に制御する手法が想定されており、波源の評価等において、強度・位相・ビーム方向の変化をリアルタイムに測定できる計測装置が求められる。

電界分布を可視化する方法として、コイルやアンテナを機械的走査する手法が考えられる。この手法は高感度かつ高精度な計測が可能であるが、1 回の撮像時間が数時間以上と非常に長い時間が必要となる。特に、周波数が高くなるにつれて導波管アンテナの開口径が小さくなる。それによって、空間分解能を高くできる代わりに 1 回の撮像時間がそれにつれて長くなってしまふ。さらに、コイルやアンテナの金属体が観察対象の電界への侵襲性が高く、近傍界を適切に評価することが難しいといった課題があった。

それに対して、電気光学 (EO: Electro-optic) 的手法に基づく、EO 結晶が電界によって誘起される複屈折変化を計測することで、電界を検出する手法が提案されている[3]。この EO 結晶をプローブとして機械的走査をするだけでなく、EO 結晶と偏光イメージセンサを組み合わせることによって、一括して電界分布を得ることが可能となる[4-8]。この手法を用いることによって、機械的走査が不要となる高速な電界イメージングが可能となる。さらに、EO 結晶として利用される ZnTe 結晶の誘電率は 10 程度であり、金属に比べて低擾乱な計測が可能となる。さらに、この EO 結晶は THz 帯までの広帯域特性を持っている。

本研究で作製する電界撮像システムは、光ヘテロダイン法に基づいている。イメージセンサの動作周波数は、観察対象の電界周波数に対して非常に高く、電界による複屈折変化を直接観察することは困難である。そのため、図 1 に示される概念図のように、観察対象の電界周波数 f_{RF} から少しずれた周波数 f_{LO} で変調した局部発振 (LO) 変調光を EO 結晶に照射する。EO 結晶と偏光子を光学ミキサとして利用することによって、EO 結晶で生じる複屈折変化を光強度に変換し、イメージセンサのフォトダイオードで光強度検出を行う。この際、 f_{RF} と f_{LO} の 2 つの変調成分がミキシングされ、その周波数差 $f_{IF} = |f_{RF} - f_{LO}|$ のビート信号が観察される。このビート信号をイメージセンサの動作周波数よりも低い周波数に設定することで、イメージセンサといった低速な検出系でも高周波電界検出が可能となる。実際の通信機器では、この f_{RF} は常に一定ではなく、ある程度のバンド幅 (Δf) を持って常に変化する。先行研究では、マイクロ波帯の 2.4 GHz 帯において、この Δf の成分を観察対象の近くに配置されたアンテナを用いて検出し、光 LO 信号生成システムにフィードバックをすることで、 f_{IF} が常に一定にする動作を行うシステムを開発した[7]。また、光変調部において、 $V\pi$ 電圧よりも高い信号強度で光強度変調器 (Mach-Zehnder modulator, MZM) に信号入力することで、 ± 2 通倍信号を生成し、100 GHz 帯の光 LO 信号を生成することで、100 GHz 帯における電界イメージングを実現してきた[8]。

本研究では、これらを発展させてさらに高周波数帯に対応させた。開発内容としては大きく分けて「観察対象の電界周波数をフィードバックする LO 信号生成システムの高周波化」と「300

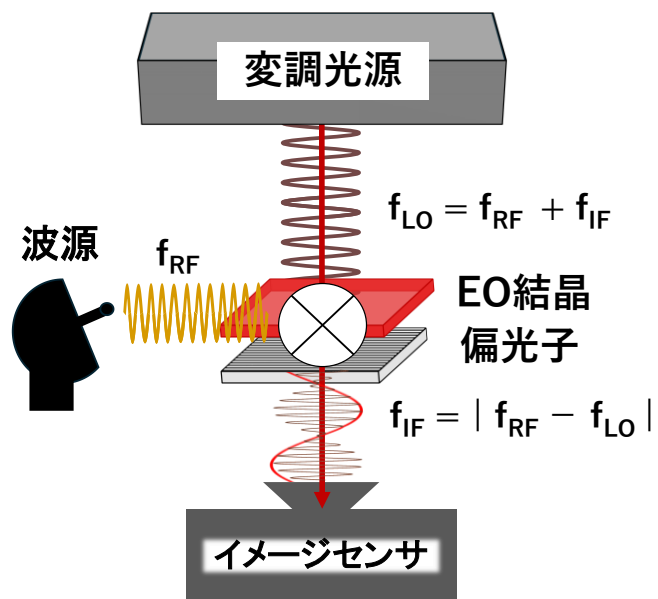


図 1 光ヘテロダイン手法に基づく電界イメージング

GHz 帯以上に対応する光 LO 信号を生成するシステムの開発」に分類される。前者に関しては、25 GHz 帯の準ミリ波帯に対応させ、そののちに 100 GHz 帯まで対応させた。また、高周波 MMIC を用いた 300 GHz 帯電界周波数検出のためのミキサの作製および、ワイヤグリッド偏光子を用いた空間分岐系の作製を行った。後者に関しては、光強度変調器に加えて 2 台の光位相変調器によって光コム合成手法に基づく高次通倍信号を生成し、2 台の光サーキュレーターと Fiber Bragg Grating (FBG) フィルタ、光カプラを用いて、目的の周波数成分を取り出すフィルタリングシステムを通すことで、目的の周波数成分を持つ変調光の生成を行った。この変調光を利用して、電界イメージングを行うことによって、約 30 mW の 270 GHz の電界を WR10 テーパー導波管から放射した電界分布を 1 回の撮像時間が約 10 秒の速度で得られることを確認した。

2 作製した高周波電界イメージングシステム

2-1 二重偏光子構造に基づく高感度電界イメージングシステム

E0 結晶で生じる複屈折変化は非常に微弱であるため、高い信号対雑音比 (SNR) での計測が必要となる。高 SNR での計測には、観察対象となる E0 結晶に高い照射光密度での変調光照射および、容量の大きいフォトダイオードで検出することにより実現されることが多い。しかしながら、イメージセンサに搭載されているフォトダイオードは画素サイズが非常に小さく、画素容量が小さいため、画素飽和が生じやすい。そのため、受光可能な光量上限が低く、観察対象で発生した微弱な偏光変化を高 SNR で計測することが難しい。さらに、光一点計測のシステムでは、大面積で大容量のフォトダイオードが用いられるだけでなく、差動フォトレシーバーによる差動信号検出が実現され、光源の変動などに伴う同相雑音成分を抑制することが可能となる。それに対して、通常のイメージセンサを用いた手法では、この差動検出をイメージセンサ単体で実現することは困難である。

そのため、我々は今までに二重偏光子構造に基づく高感度電界イメージングシステムを提案してきた[4-8]。この二重偏光子構造では、図 2 に示されるように、偏光ビームスプリッタを一樣偏光子として利用する。この一樣偏光子に加えて各画素上に金属配線層で作製されたワイヤグリッド偏光子を持つ偏光イメージセンサを重ねることで二重偏光子構造としている。本手法では、一樣偏光子を入射偏光に対して非透過方向に設置することによって、イメージセンサ画素への入射光量を大幅に低減し、画素飽和を回避することで、高い照射光密度で E0 結晶に変調光を照射することが可能となり、SNR が飛躍的に改善される。加えて、一樣偏光子に対して、画素上偏光子を $\pm 45^\circ$ になるように配置している。この角度では、偏光変化に対する光強度変化が最大となる点であり、一樣偏光子に比べて消光比を高くすることが難しい画素上偏光子性能の緩和が可能となる。さらに、隣り合う画素上偏光子が位相差 $\pi/2$ となるように配置し、隣り合う画素出力の差分を取得することによって、チップ単体での差動検出を実現する。

E0 結晶に対して、高い照射光密度のために、半導体光増幅器 (SOA) を用いて、コリメータから照射された光は、1/2, 1/4 波長板によって偏光状態を調整した後、偏光ビームスプリッタによって、E0 結晶側に折り返され、1/4, 1/8 波長板で再度偏光状態を調整して E0 結晶に照射される。本研究では、E0 結晶として ZnTe 結晶を利用した。この ZnTe 結晶底面には、高反射膜が施されており、照射光を反射し、再度 1/4, 1/8 波長板で再度偏光状態を調整し、偏光ビームスプリッタに戻ってくる。この光の 2 往復によって、1/4, 1/8 波長板は 1/2, 1/4 波長板として機能する。偏光ビームスプリ

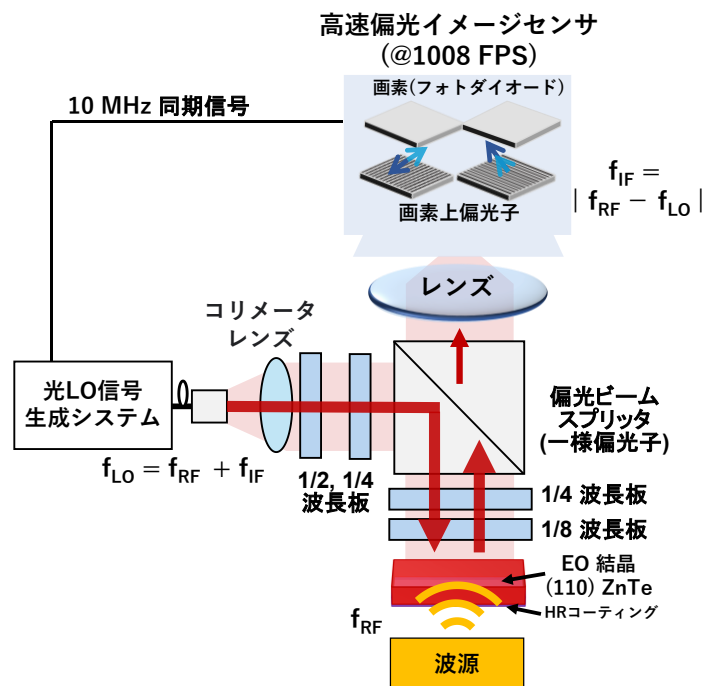


図 2 二重偏光子構造に基づく高感度電界イメージングシステム

タは、イメージセンサ側には入射偏光が非透過方向になるように波長板を調整して、入射偏光成分を大幅に低減する一様偏光子として動作する。偏光イメージセンサを 1008 FPS に設定し、 f_{IF} をその 1/4 となる 252 Hz に設定して全画素に対してロックイン検出を行い、電界分布と位相分布を取得した。

なお、本研究で利用する偏光イメージセンサは市販品ではなく、独自に開発した電界イメージング専用の偏光イメージセンサとなっている。市販されている偏光イメージセンサは主に可視光帯を目的として設計されている。しかしながら、電界イメージングでは、Si イメージセンサで検出可能かつ高速な光変調器や光増幅器が利用可能な波長 780 nm 帯を利用する必要がある。そのため、波長 780 nm 帯に特化した偏光イメージセンサの作製が必要であった。さらに、一般的に偏光イメージセンサは、透過軸の異なる 4 方向の画素上偏光子を搭載しているが、本研究は、二重偏光子構造により必要な画素上偏光子は 2 種類となる。そのため、市販の偏光イメージセンサをそのまま活用することは、無駄な画素を多く使うことになってしまうため、空間分解能の低下につながる。本研究では、0.35 μm 標準 CMOS プロセスで電界イメージング専用の偏光イメージセンサを作製し利用した。この 0.35 μm 標準 CMOS プロセスを利用することによって、近赤外光の感度が一般的な CMOS イメージセンサに比べて高いといった特徴を持つ。その反面、画素上偏光子として利用する金属配線ピッチが、波長よりも微細なものを作製することができない。そのような偏光子は、一般的なワイヤグリッド偏光子としての動作ではなく、回折格子として偏光を分離することができる。この回折格子としての偏光子はワイヤグリッド偏光子に比べて消光比を高くすることが困難である。我々はこれまでに、画素上偏光子の消光比が波長 780 nm 帯において最大となる偏光子ピッチの最適化および、画素上偏光子を 3 層重ね合わせることによって、消光比 5.7 を達成した。本研究で利用する二重偏光子構造では、消光比 5.7 では、理論計測感度の約 7 割を達成できる。このように、偏光イメージセンサと一様偏光子を組み合わせることによって、SNR を飛躍的に改善させ、高感度かつ高空間分解能、高速な電界イメージングが可能となる。

2-2 観察対象の電界周波数をフィードバックする光 LO 信号生成システム

本研究で作製した 100 GHz 帯に対応した、観察対象の電界周波数をフィードバックする光 LO 信号生成システムを図 3 に示す。観察対象として自由発振をする Gunn オシレーターを用いた。この Gunn オシレーターは Gunn ダイオードを用いた発振器であり、Gunn ダイオードをキャビティや導波管内にマントし、直流電圧を加えることで生じる結晶厚に応じた固有振動で発振をする発振器である。この Gunn オシレーターは、非常に簡単な構造で作製されるものの、周波数安定性が低く、数 MHz のバンド幅を持って常に周波数が変動する波源である。このような波源に対して、一定の周波数 f_{LO} で光ヘテロダインを行った場合、 f_{IF} 成分が安定せず、ロックイン検出が破綻してしまう。そのため、Gunn オシレーターの発振周波数の変動を検出して、それを f_{LO} にフィードバックを行うことで、常に f_{IF} が一定となる光 LO 信号生成システムを作製した。なお、100 GHz の変調光は、 V_{π} 電圧よりも高い信号強度で MZM に信号入力することで、 ± 2 通倍信号を生成し、100 GHz 帯の光 LO 信号を得る。そのため、MZM に入力する信号はその 1/4 の周波数が求められる。

Gunn オシレーターの発振周波数を $f_{RF} + \Delta f$ とした場合、生成する f_{LO}' は $(f_{RF} + \Delta f + f_{IF})/4$ となる。この信号を生成するために、観察面から少し離れた位置に配置した、ホーンアンテナで観察対象の電界周波数を検出する。ホーンアン

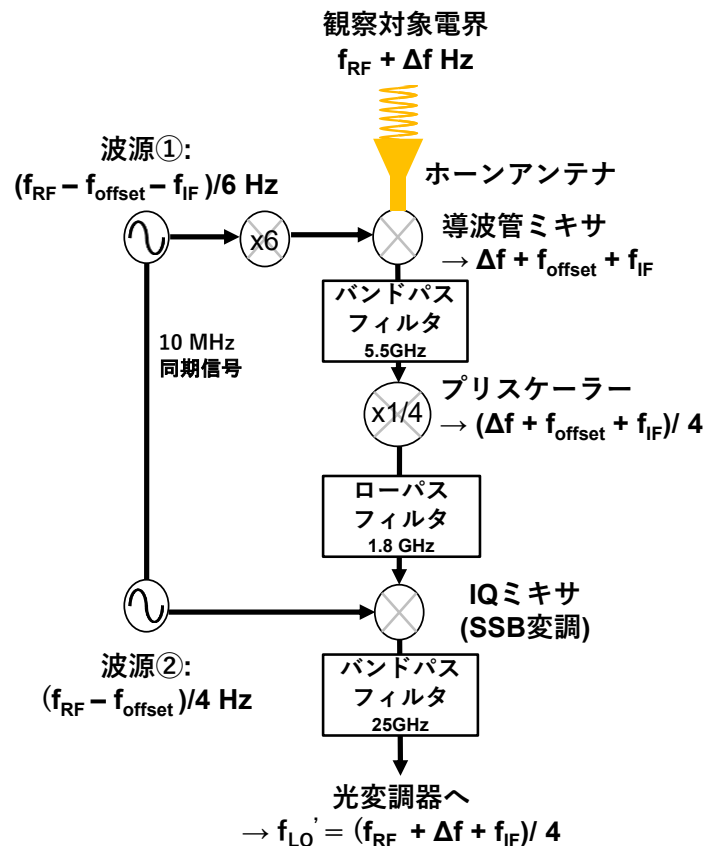


図 3 電界周波数をフィードバックする光 LO 信号生成

テナで検出された信号は、導波管ミキサに入力され、周波数のダウンコンバージョンを行う。導波管ミキサのLO信号は、イメージセンサのクロック源と10 MHzの同期信号で同期されている信号源と6通倍器で生成される。ミキサから出力される信号は、 $\Delta f + f_{offset} + f_{IF}$ Hzになるように設定している。 f_{offset} は5.52 GHzとして周波数オフセット成分を重畳しており、このオフセット成分は後段のIQミキサでのミキシングによって除去される。このオフセット成分を重畳する理由は、低い周波数帯には様々なノイズ成分が多いため、その周波数帯域を避けることと、後段のミキシングにおいて周波数オフセット成分が小さすぎると非常に狭帯域なフィルタが要求されるため、その性能要求を緩和することにある。さらに、入手性の良い高周波部品の帯域に合わせて、このオフセット周波数を決定している。

導波管ミキサで周波数ダウンコンバージョンを行った信号は、5.5 GHz帯のバンドパスフィルタを通したのち、1/4プリスケalerで周波数分周を行う。1/4プリスケalerの出力波形が矩形波であったため、基本波以外の高次通倍信号成分を低減するために、1.8 GHzのローパスフィルタを通した。そののち、IQミキサで $(f_{RF} - f_{offset})/4$ の信号とミキシングを行う。この時、IQミキサに入力する信号位相を調整することで、Single Side Band (SSB) 変調を行い、Upper Side Band (USB) が最大となるようにした。その出力を25 GHzのバンドパスフィルタを通し、RFアンプで増幅を行い、MZMの V_{π} 電圧よりも高い信号レベルまで増幅しMZMに入力した。

2-3 広帯域光LO信号生成システム

先行研究では、MZMの V_{π} 電圧よりも高い信号レベルを入力し、MZMのバイアス電圧を光出力が最小となるNullバイアスに設定することによって、 ± 2 通倍信号を生成し、4通倍光変調信号を得た。本手法を用いて生成できる高次通倍信号は ± 2 通倍信号以上のものはMZMの動作帯域および入力可能な信号レベルの上限によって困難である。そのため本研究では、図4に示されるように、光コム合成手法によってさらに高次通倍信号を生成した。この光コム合成手法では、MZMに直列接続した光位相変調器(PM)を用いる。PMに入力する位相と強度、PMの台数を調整することで、任意の周波数通倍信号を得ることが可能となる。なお、PMの利用する台数を増やすことによって、広帯域な光コムを生成可能となり、飛躍的に観察周波数を向上させることが可能となる。しかしながら、この光コムには様々な周波数成分を持つが、電界イメージングの光ヘテロダインに用いるためには、不要な信号成分が多く存在する。特に、奇数次通倍信号は、それぞれの位相が π ずれており、その信号成分を用いて光ヘテロダインを行うと、それぞれが打消しあってしまう、電界検出ができなくなってしまう。そのため、本研究では目的の周波数成分のみを取り出すような光フィルタ回路を作製した。この光フィルタでは、50:50光カプラを用いて変調光を2分割し、光サーキュレーターとFiber Bragg Grating (FBG)フィルタを用いて、 $\pm$ それぞれの通倍信号を取り出すように動作させる。その後、2つの光を光カプラによって、再度合波することで、目的の周波数成分のみを持つ光変調光が得られる。なお、このFBGは予算の都合上、片側は可変FBG、片側を固定FBGとした。可変FBGの透過波長とレーザー光源の温度調整によって、任意の波長を取り出す動作が可能となった。光コム生成およびバンドパスによって、出力される光強度は非常に小さいものとなる。特に、波長780 nmでは、一般的に光通信で利用される波長1550 nm帯に比べてフォトリラクティブ効果の影響が大きく、MZMに入力可能な光強度上限はあまり高くすることができない。そのため、本研究では、半導体光増幅器で光増幅を行い、光学系に入射する。

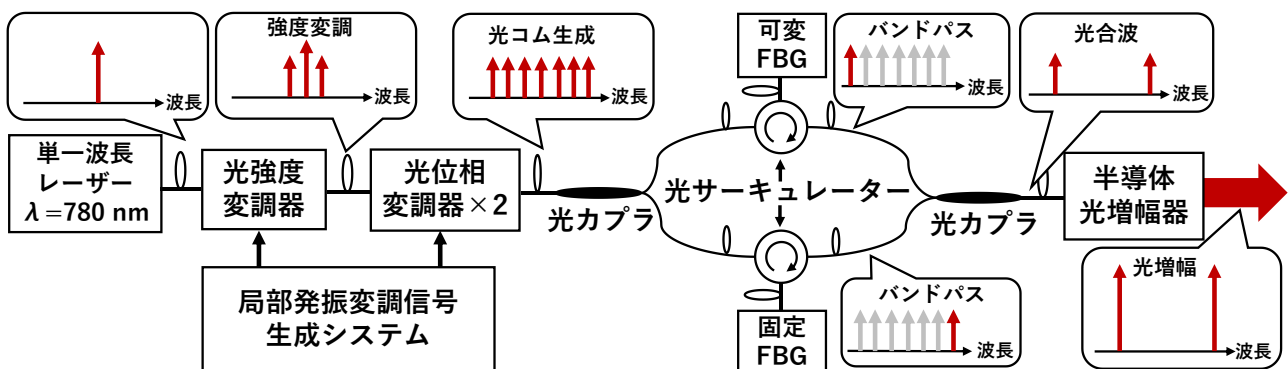


図4 広帯域光LO信号生成システム

3 結果

3-1 100 GHz 帯 Gunn オシレーターに追従した電界イメージング

観察対象として用意した Gunn オシレーターは、機械的なつまみを操作することによって発振周波数が調整できる。このつまみを調整して、102 GHz 周辺に発振周波数を設定した。まず初めに、この Gunn オシレーターの周波数安定性の評価を行った。L0 信号生成に利用する導波管ミキサと 6 通倍器を用いて、 $f_{IF} = 102$ MHz 周辺になるように信号源等を調整して、その信号を周波数カウンタで計測した。周波数カウンタのゲートタイムを約 0.15 秒として、100,000 サンプルを取得し、標準偏差、アラン偏差を求めた。その結果、Gunn オシレーターの発振周波数は ± 1 MHz の範囲で常に変動しており、標準偏差は 244 kHz であった。アラン偏差は、Flicker FM ノイズと Random walk FM ノイズの中間的な傾きで単調増加しており、自由発振器としての周波数不安定性が確認された。特に、撮像時間を 4 秒としたときのアラン偏差は 10^{-3} 程度であり、これは、IF 周波数の約 100 kHz に相当する。この結果から、単なるフレーム積算数を増やすことによる平均化処理では対応できず、観察対象の周波数に追従した電界イメージングが必要であることが確認された。

続いて、作製した L0 信号生成部からの信号 RF スペクトルアナライザで計測した結果を図 5 に示す。目的通り、25.5 GHz 周辺に大きな信号スペクトルが観察されている。BPF によって、キャリア成分および LSB 成分を大幅に低減することができており、LSB 成分はノイズフロアレベルまで低減されている。これらの成分は光ヘテロダイン時に SNR を悪化させるノイズ成分となってしまうため、できる限り低減することが望ましい。続いて、これを LiNbO₃ based MZM(iXblue, NIRMX800-LN-20)に入力して光変調を行った。目的通りにキャリア光成分に対して ± 2 通倍成分に大きなスペクトルが観察され周波数に換算すると 102 GHz 帯の光強度変調ができていることが確認された。この変調光をインライン型 SOA とテーパー型 SOA の 2 段光増幅によって、200 mW 程度まで増幅し、光学系に入射した。

電界イメージングは、Gunn オシレーターの信号を導波管アンプで増幅し、13.1 dBm の強度で WR10 導波管端から放射した。この導波管端に厚さ 0.1 mm の (110) ZnTe 結晶を直接配置して電界イメージングを行った。その際利用した (110) ZnTe 結晶は、照射する偏光方向により、面内の一方方向の電界に対して感度を持つ。本実験では、導波管の長辺間の電界に対して強度を持つように結晶の向きと偏光状態を調整した。偏光イメージセンサから、4000 枚のデータを取得し、ロックイン検出処理を行う。その結果、図 6 に示されるような電界強度分布と位相分布が 1 回の撮像時間約 4 秒で実現された。導波管内部で電界強度が強くなり、一定の位相分布が可視化されている。なお、導波管短辺周辺で位相の大きな変化がみられるが、これは、E0 結晶を導波管に直接配置したことによる反射波の影響が可視化されている。この結果は、電磁界シミュレーションでも同様な結果が得られている。

この電界イメージングを連続的に取得して、電界分布の動画像を作製することができる。電界像を 52 枚連続的に取得して動画像を作製した結果、位相分布が変化している様子が確認された。これは、周波数追従システムやイメージセンサのフレームレートのジッタ等に伴う周波数のずれが

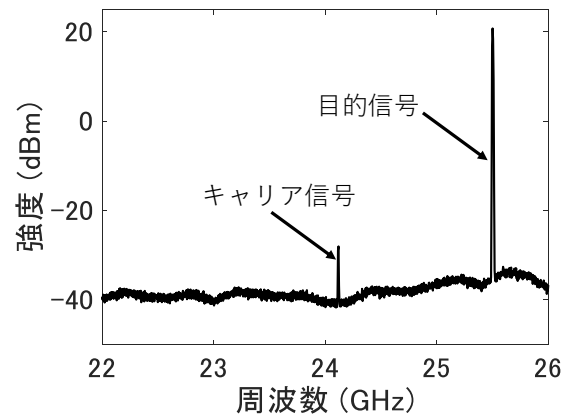


図 5 L0 信号生成部からの信号スペクトル

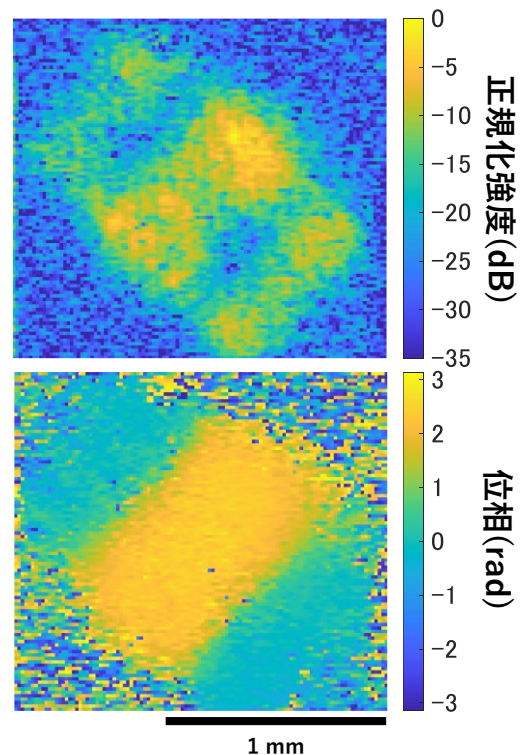


図 6 Gunn オシレーターからの 100 GHz 非同期電界イメージング結果

影響していると考えている。検出面内の1点の位相を計測し、それによる補正を行うことですべての位相分布像の時間的变化は見られなくなり、観察面内における相対的な位相分布には影響がないことを確認した。

3-2 MMIC を用いた 300 GHz 帯信号検出

上記でのシステムでは、100 GHz 帯までの対応となってしまう。それ以上の周波数に対応させるためには、さらに高周波帯に対応したミキサが必要となる。本研究では、TRA240-097 を用いた 300 GHz 帯の周波数検出の動作確認を行った。この TRA240-097 は 222.5~267.5 GHz 程度の帯域を持ち、外部 LO 信号を入力することで、内部で18 通倍しその信号とチップ内部に作製されたアンテナで受信・ミキシングを行うことができる MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) チップである。

本チップの評価のために、Gunn オシレーターで 100 GHz 帯の信号を生成し、3 通倍器を用いて 278 GHz の信号生成し、その周波数計測を行った。TRA240-097 の公称値以上の周波数が検出可能であることが確認され、280 GHz 程度まで信号の検出ができることが確認された。出力される信号強度においても、周波数計測に十分な SNR が得られることを確認している。周波数安定性に用いたシステムは、上記までの 100 GHz 帯の Gunn オシレーターの周波数安定性評価に用いた計測系をベースにして、検出部を TRA240-097 に変更した。サンプル点を 1000 点として、周波数計測を行った結果および、アラン偏差を求めた。その結果を図 7 に示す。Gunn オシレーター計測の結果同様に時間的に周波数が変動し、標準偏差は 198 kHz と算出された。この結果は Gunn オシレーター単体とほぼ変わらない結果となり、目的通りの動作ができていることが確認された。

本 MMIC を用いることで、3-1 で作製した LO 信号生成システムへのフィードバックが可能となり、300 GHz 帯における非同期電界イメージングの実現が期待される。なお、MMIC が対応可能な LO 周波数帯域には制限があるため、狭帯域フィルタの導入が必要となる可能性が高く、この点が今後の課題となる。

3-3 ワイヤグリッド偏光フィルムを用いた空間分岐系の試作

観察対象の電界周波数の計測において、ビームの非常に細い電界を想定した場合、観察面外での検出が困難となる。そのため、THz を空間的に分岐する必要がある。

本研究では、その空間分岐系を、ワイヤグリッド偏光フィルムを用いて実現した。図 8(a) にワイヤグリッド偏光フィルム (Mecanusa, MLP-WG-COP) を 3 枚用いた空間分岐系の概念図および評価系を示す。本ワイヤグリッド偏光フィルムは非常に薄い樹脂フィルム上に金属ナノワイヤを形成した偏光子である。6 通倍器と 3 通倍器で 297 GHz の信号を生成し、導波管端から放射した。放射された電界は、空間分岐系に入射し、45° に傾けて配置された 2 番目の偏光子によって、分岐率の制御を行った。分岐された THz 波は、熱型のパワーメータ (Virginia Diodes Inc., PM5) で強度検出を行った。図 8(b) において、透過側・反射側ともに約 90° 周期で強度が変動していることが確認された。透過側の最大強度は約 0.34 mW、反射側の最大強度は約 0.36 mW であり、両者はほぼ同程度の値を示した。これは、2 番目の偏光子における反射と透過のエネルギー分配が、大きく偏ることなく実現されていることを示唆している。なお、両者の最大強度の合計は、フィルムによる吸収や偏光子表面・界面での散乱損失等が発生していることが想定される。今後高精度な THz-TDS 等の計測によってこれらについて評価を実施する予定である。一方で、透過側・反射側いずれにおいても、強度が完全にゼロまで落ち切らず、谷の部分で数十 μ W 程度のオフセットが残存している。この残留成分は、偏光

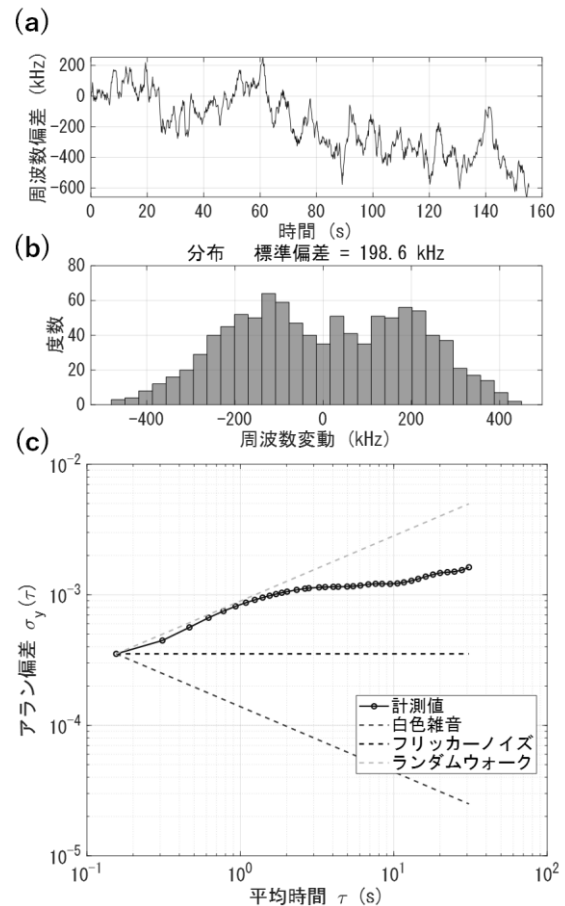


図 7 MMIC を用いた 278 GHz アラン偏差測定

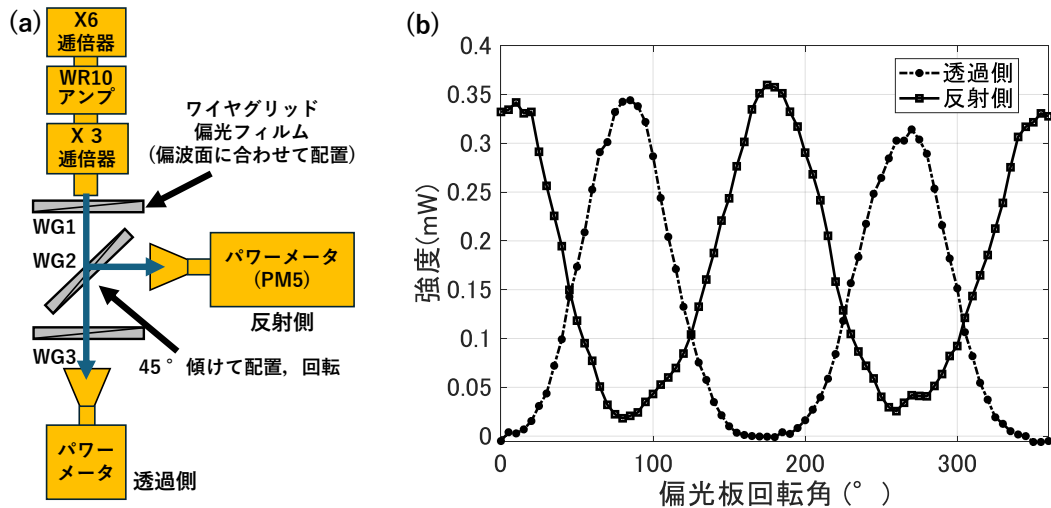


図 8 (a)実験セットアップ, (b)計測結果

子の消光比に起因する漏れ光,あるいは1番目・3番目の偏光子における配置誤差や,導波管開口から放射される電界の偏波純度によるものと考えられる。

また,透過側と反射側の強度変化がほぼ位相差 $\pi/2$ を保ったまま全周期にわたって追従していることから,本分岐系は単一の可動偏光子(2番目の偏光子)の回転角のみで分岐率を一意に決定できることが確認された。これは,観察対象に照射するTHz強度をサンプルに応じて連続的に調整できることを意味し,本手法が電界周波数検出用の分岐系として実用上十分であると考えている。

3-4 広帯域光LO信号生成とそれを用いた300GHz帯電界イメージング

本研究で作製した,広帯域光LO信号生成の構成は先述の図4に示している。この光LO生成において,初めに光コム合成手法に基づく,高次通倍信号の生成動作の確認を行った。動作確認のために光変調器に8.3GHzの信号を入力し,光強度変調器のみ,MZM+PM1台の場合および2台の場合で動作させた結果を図9に示す。MZMに加えてPMを組み合わせることによって,高次通倍信号が生成できることを確認した。この本実験では,目的の高次通倍信号を ± 6 次として生成している。目的通りに, ± 6 次通倍信号が生成できおり, ± 7 次通倍信号まで比較的フラットな光コムが得られていることが確認できた。

光源レーザー(Thorlabs, DBR780PN)の温度特性を確認した。100mAでレーザー発振をさせた状態で温度を22.5℃から27.8℃まで変化させて光スペクトルアナライザでピーク波長を計測した。その結果,温度に応じてほぼ線形に変化し,1℃変化させると0.047nm変化することを確認した。この変化は,1℃変化させることで,23.5GHzの調整が可能となる。

生成された光コムから目的の周波数成分のみを抽出するフィルタ回路の動作確認を行った。光位相変調器を2台直列に接続し,25GHzの信号を入力することで光コムを生成した。図10(a)に,300GHzの生成を目的として光変調を行った際の結果を示す。また図10(b)に,光フィルタ回路を透過させた後,SOAを2台直列接続して光増幅を行い,99:1カプラで光分岐した

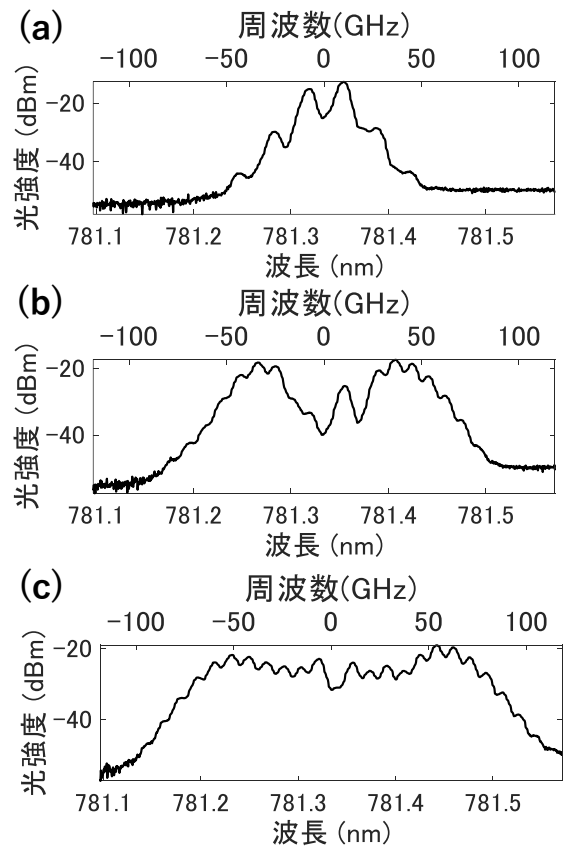


図 9 光コム生成結果

(a) IMのみ, (b) IM+PM, (c) IM+PM 2台の場合

上で、透過光強度 1%側の光を光スペクトルアナライザで計測した結果を示す。フィルタ回路を通す前は、多数の高次通倍信号が確認された。これに対し、フィルタ回路を通すことで、目的とする ± 6 次通倍信号を最大化できることを確認した。このフィルタ回路では、可変 FBG によって左側 (-6 次側) を、固定 FBG によって右側 ($+6$ 次側) を抽出している。利用した可変 FBG の 3 dB 帯域は 0.075 nm であり、これは 37 GHz に相当する。それに対して、固定 FBG の 3 dB 帯域は 0.18 nm であり、これは 90 GHz に相当する。可変 FBG からの光スペクトルは非常に幅が狭く、隣接する通倍信号の強度を 10 dB 以上低減できている。一方、固定 FBG 側ではスペクトルが広がっており、隣接する通倍信号との強度差はあまり大きくない。光ヘテロダインでは入射する光成分すべての組み合わせでビート信号が生じるが、次数差が異なる組み合わせ (例えば -6 次と $+7$ 次) は目的の 300 GHz とは異なる周波数となるため、目的信号としては検出されない。一方、 -5 次と $+7$ 次、あるいは -7 次と $+5$ 次の組み合わせは、主信号 (-6 次と $+6$ 次) と次数差が等しく、同じ 300 GHz にビート信号を生じうる。しかし、可変 FBG からの信号は -7 次および -5 次通倍信号についても 10 dB 以上低減できているため、これらが $+5$ 次および $+7$ 次通倍信号と光ヘテロダインされた場合においても、信号強度への影響は小さいと考えている。今後、両方の FBG についてさらに狭帯域なものを利用することで、電界イメージングの SNR 改善に寄与すると考えられる。

続いて、目的の周波数を 600 GHz として、光位相変調器に入力する位相を調整した。その結果を図 11(a) に示し、可変 FBG の設定および光源 LD の温度を調整した結果を図 11(b) に示す。300 GHz の時と同様な結果が得られている。光位相変調器を 2 台利用した場合は、600 GHz の光変調まで対応可能である見込みが得られた。それ以上の周波数に対応するためには、さらに位相変調器を追加する、またはさらに高周波帯域に対応した光変調器を利用することによって対応可能であると考えている。

最後に、作製した広帯域光 LO 信号生成システムとそれを用いた 300 GHz 帯電界イメージングを実施した。本実験では、観察対象の波源として、6 通倍器と 3 通倍器で 270 GHz + 252 Hz、約 30 mW の電界をテーパ導波管から放射した。E0 結晶を 0.3 mm 厚の (110)-ZnTe とした。イメージセンサクロックおよび波源と同期された 22.5 GHz を光強度変調器、光位相変調器 2 台に入力し、光位相変調器に入力する各位相を調節したうえで、フィルタ回路を通すことで、 ± 6 次通倍信号が最大となるように調整を行った。その時の光スペクトルを図 12 に示す。この変調光を電界イメージングシステムに入力し、電界イメージングを行った。この時、10,000 フレームから全画素に対して高速フーリエ変換 (FFT) を行い、252 Hz の成分を取り出した。1 回の撮像時間は約 10 秒となる。その結果を図 13 に示す。導波管内部で電界強度が高くなり、一定の位相が検出され

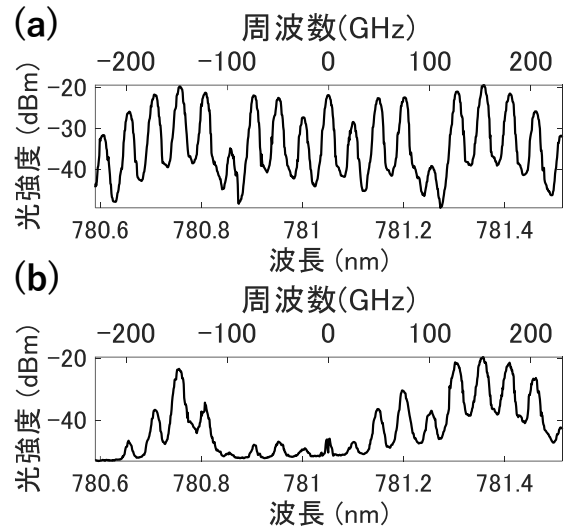


図 10 300 GHz を目的とした光変調スペクトル
(a) フィルタ前, (b) フィルタ後

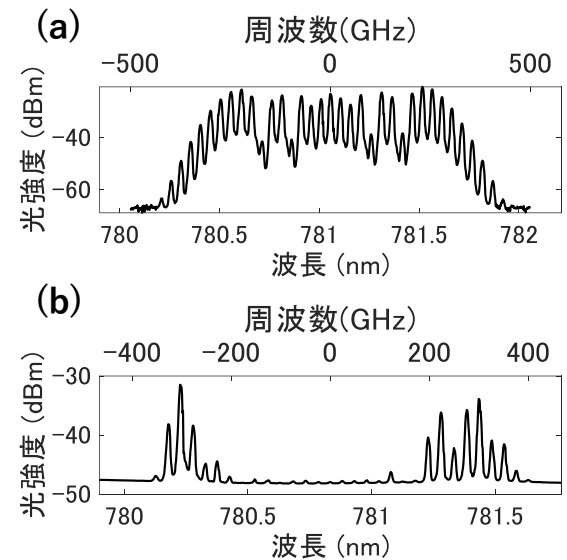


図 11 600 GHz を目的とした光変調スペクトル
(a) フィルタ前, (b) フィルタ後

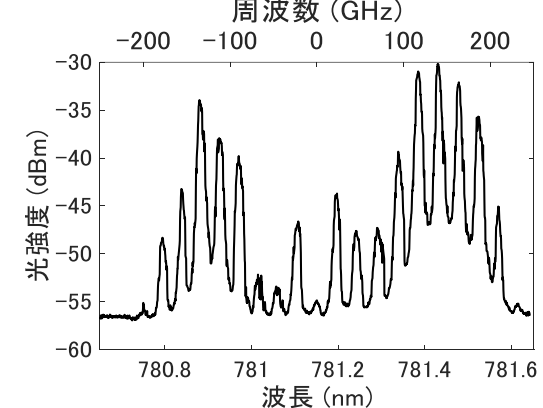


図 12 電界イメージングを実施した際の
270 GHz 変調光スペクトル

ていることがわかる。本イメージングにおいて、積算フレーム数を増加させると逆に SNR が悪化することが確認された。その理由として、光ヘテロダインにおいて計測される 252 Hz の信号位相が一定ではないことが考えられる。その位相変動は、目的の高次通倍信号を取り出す光フィルタ回路から発生しているのではないかと考えている。2 方向に分岐して FBG によって目的の周波数スペクトル成分のみを反射させているが、光サーキュレーターから見て FBG によって反射される位置が異なっており、それによって、2 つの光信号の位相がずれてしまっているためではないかと考えている。今後、光サーキュレーターのちに光ディレイラインを追加し、光位相の調整を行うことによって、さらに安定した電界イメージングが可能ではないかと考えている。また、本実験では、変調光を $\Phi 1.5$ mm のコリメータから E0 結晶に照射した。この観察範囲では、導波管全体をイメージングすることができておらず、一部分の電界イメージングとなってしまった。観察範囲を広げるためにさらに高ゲインな光増幅器の利用および、ビームエキスパンダ等での光照射範囲の増加によってこれを達成することができると考えている。

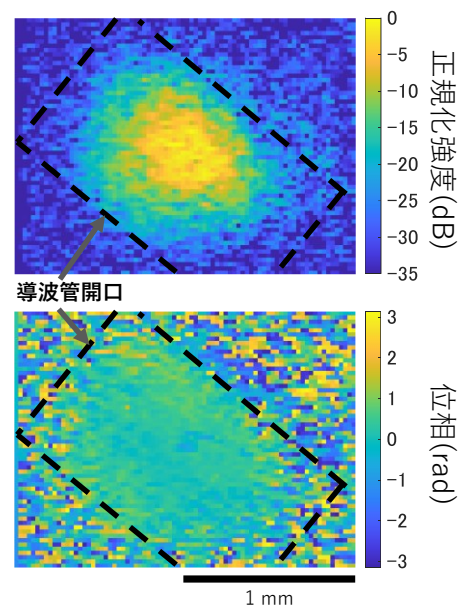


図 13 270 GHz 電界イメージング結果

4 結論

本研究では、THz 帯の Beyond 5G/6G 関連デバイス・回路評価に向けた広帯域電界分布撮像システムの開発を行った。

電界イメージングにおいて、観察対象の波源に接続することなく電界イメージングを可能とするシステムの開発を行った。この開発では、100 GHz 帯において、自由発振する Gunn オシレーターを観察対象として用い、ホーンアンテナと導波管ミキサによって発振周波数の変動を検出し、光 L0 信号生成系へリアルタイムにフィードバックする非同期電界イメージングシステムを開発した。これにより、 ± 1 MHz 程度の周波数変動を持つ波源に対しても、1 回の撮像時間約 4 秒で安定した電界強度・位相分布の取得に成功した。さらに、300 GHz 帯以上への対応に向けて、MMIC (TRA240-097) を用いた高周波信号検出系を試作し、280 GHz 程度までの周波数計測が、Gunn オシレーター単体と同等の安定性(標準偏差 198 kHz)で可能であることを確認した。また、ワイヤグリッド偏光フィルムを用いた THz 波空間分岐系を試作し、単一偏光子の回転角のみで分岐率を連続的に制御できることを示した。

次に、光 L0 信号生成については、光位相変調器 2 台を直列接続した光コム合成手法と FBG フィルタ回路を組み合わせることで、目的の高次通倍成分のみを選択的に抽出する手法を確立し、600 GHz 帯までの光変調動作を確認した。本手法を適用し、約 30 mW の 270 GHz 電界源に対して、1 回の撮像時間約 10 秒での電界イメージングを実現した。一方で、FBG フィルタ回路における光路長差に起因すると考えられる光ヘテロダイン信号の位相変動、照射光のビーム径による観察範囲の制限、さらに MMIC が対応可能な L0 周波数帯域の制限に伴う狭帯域フィルタの必要性といった課題も明らかとなった。今後は、光サーキュレーター後段への光ディレイライン追加による位相補償、より高ゲインな光増幅器やビームエキスパンダの導入による観察範囲の拡大、さらに狭帯域な FBG の採用による SNR 改善を進める。また、光位相変調器の追加やより高周波帯域に対応した光変調器の導入によって、1 THz に向けたさらなる高周波対応を検討する。また、本研究では波源の用意の都合上、270 GHz 帯における電界イメージングの実証にとどまったが、今後は MMIC による非同期周波数検出系とフィルタリングシステムを統合し、300 GHz 帯以上における非同期電界イメージングの実証を進めていく予定である。さらに、観察周波数向上の実証も同時に進めていく。

【参考文献】

- [1] S. L. Feng, A. Zahid, A. Renet al. "The perspectives and trends of THz technology in material research for future communication-a comprehensive review." *Physica Scripta*, **98**, 6, 065006, 2023.
- [2] 国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT): "Beyond 5G/6G White Paper 日本語 3.0 版", 東京都小金井市 (2023).

- [3] S. Wakana, T. Ohara, M. Abe, et al., “Fiber-edge electrooptic/magneto-optic probe for spectral-domain analysis of electromagnetic field,” *IEEE Trans. on Microw. Theory Tech.*, **48**, pp. 2611–2616 (2000).
- [4] M. Tsuchiya, K. Sasagawa, A. Kanno, and T. Shiozawa, “Live Electrooptic Imaging of A W-Band Waves,” *IEEE Trans. on Microw. Theory Tech.*, **58**, 3011–3021 (2010).
- [5] K. Sasagawa, R. Okada, M. Haruta, et al., “Polarization Image Sensor for Highly Sensitive Polarization Modulation Imaging Based on Stacked Polarizers,” *IEEE Trans. Electron Devices*, **69**, 2924–2931 (2022).
- [6] R. Okada, M. Mizuno, T. Nagaoka, et al., “Millimeter-Wave Band Electro-Optical Imaging System Using Polarization CMOS Image Sensor and Amplified Optical Local Oscillator Source,” *Sensors*, **24** (2024).
- [7] R. Okada, M. Mizuno, H. Takehara, et al., “Microwave electro-optical imaging system using a frequency tracking optical local oscillator source with a polarization CMOS image sensor,” *IEICE Electron. Express*, **22**, 20240742–20240742 (2025).
- [8] K. Sasagawa, R. Okada, M. Mizuno, et al., “105-GHz electric field visualization by electro-optic imaging system using polarization image sensor,” in 2024 54th European Microwave Conference (EuMC), (IEEE 2024), pp. 628–631.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Asynchronous Quasi-millimeter-wave Electro-optic Imaging System Using Polarization Image Sensor	2025 IEEE Photonics Conference (IPC2025)	2025. 11. 12
Asynchronous Microwave Electric Field Imaging System Using LiNbO3 Sensor	Progress In Electromagnetics Research Symposium2025 (PIERS2025)	2025. 11. 8