

論文内容の要旨

博士論文題目 画素上偏光子搭載 CMOS イメージセンサを用いた 高周波電界イメージングシステムに関する研究

氏 名 岡田 竜馬

(論文内容の要旨)

次世代移動通信の Beyond 5G/6G ではミリ波帯から THz 帯を利用した超大容量高速通信が検討されている。この周波数帯の電波安全性評価に向けて、瞬時に正確な電力密度分布を取得する技術が必要となる。特に、100 GHz を超える THz 帯の世界標準の電力密度分布計測技術はほぼ確立されていない。本研究は独自の偏光イメージング技術に立脚して高感度な高周波電界イメージングシステムを構築し、ミリ波帯～THz 波を高速かつ高感度に可視化することを目的としている。高周波フォトンクスに基づく電気光学(EO)プローブを用いた手法は、電界による1次電気光学効果(Pockels 効果)による EO 結晶の複屈折率変化を検出する。EO 結晶とイメージセンサを組み合わせる手法では、検出部に金属を用いないため、低擾乱な計測であり、偏光イメージセンサを用いた並列検出による高速な電界イメージングシステムとなる。しかしながら、イメージセンサが扱える光量の低さと光学系の単純化の必要化から高感度化が難しかった。本研究では、一様偏光子と電界イメージングに最適化した偏光イメージセンサによってこれらを解決し、0.1 THz 帯までに対応した電界イメージングシステムの開発を行った。

本研究では、二重偏光子構造による微弱偏光イメージング手法の実証と電界イメージング向けに、波長 780 nm 帯に最適化した画素上偏光子を持つ偏光イメージセンサを開発した。本手法では、各画素上に CMOS 金属配線層によるワイヤグリッド偏光子を搭載した偏光イメージセンサに一様偏光子を重畳する。一様偏光子は入射偏光に対してクロスニコルになるように配置され、センサに入射する光量の低減と計測される偏光の増強を行う。画素上偏光子は一様偏光子に対して $\pm 45^\circ$ に配置される。この角度では、偏光変化に対する透過光強度

の変化率が最大となる点である。また、互いに直交する偏光子画素ペアで差分を取ることによって、チップ単体での差動検出が実現され、同相ノイズに強い構成となっている。電界イメージングでは、高速な光変調器や半導体光増幅器が存在する波長 780 nm 帯を利用する必要がある。この波長帯で最大の性能とするために画素上偏光子ピッチの最適化と構造の最適化を行った。結果として、波長 780 nm 帯に消光比が 5.7 となるピークを持つ結果となった。これにより、消光比が無限大の理想的な偏光子を用いた場合である理論的な計測感度限界の約 7 割が達成される。

本研究では、観察対象の周波数(f_{RF})が時間的に変動するような波源にも対応する、高速かつ高光強度な光局部発振変調(LO)信号源の開発を行った。この光 LO 光源と作製した偏光イメージセンサを組み合わせた 0.1 THz 帯の電界イメージングシステムを構築し、近傍電界を非常に高速かつ高空間分解能でイメージングすることに成功した。

(論文審査結果の要旨)

高度な情報通信による社会の発展のため、次世代の無線通信 (Beyond-5G/6G) の開発が多方面で進められている。その一つは、現在の第5世代無線通信技術で利用されているマイクロ波からミリ波帯よりもより高い 100 GHz 以上の周波数帯を利用した高速無線通信である。このような高周波数帯では、金属を用いた伝送線路の減衰が大きく従来の電気的手法を拡張した計測法の適用が難しい。また、高速かつ高分解能な電界分布計測を行う手法が確立されていない。

一方、高い周波数帯の電界を検出する方法として、特に THz 帯の電磁波を用いた計測分野では電気光学効果を利用した手法が用いられている。電界分布を光学像として並列に読み取るため、高い時空間分解能を達成できるが、感度が低い。また、パルスレーザーを用いた時間領域での計測法であるため、周波数分解能の向上が難しいという課題があった。

本研究では、電気光学効果を用いつつ、周波数領域での検出を可能とする高速かつ高分解能な電界イメージングシステムが実現された。これを達成するためには、微弱な偏光変化を検出する必要があったため、これを可能とする偏光イメージセンサとこれを用いた検出光学系を作製した。画素上に搭載する偏光子は $0.35\text{-}\mu\text{m}$ CMOS プロセスの金属配線層を用いた構造を最適化し、計測に利用する波長 780 nm に対して消光比 5.7 を達成した。また、列毎に互いに直交する偏光子を配置し、差動検出によって偏光の微弱な変化を検出する手法を示した。光学系については、画素上偏光子に加えて、透過偏光軸を 45° ずらして高消光比の一樣偏光子を搭載することで、イメージセンサ画素飽和による制限を大きく低減し、より高強度の光を用いた高感度な電界検出を実証した。

イメージセンサでは高周波電界のような高い周波数の信号を直接検出できない。そのため、光ヘテロダイン法を用いる。すなわち、観察対象の高周波電界信号 (周波数 f_{RF}) は、局部発振周波数 f_{LO} で変調された光信号を用いて読み取ることでミキシングされ、イメージセンサで検出可能な低い周波数 ($f_{\text{IF}} = |f_{\text{RF}} - f_{\text{LO}}|$) へと変換される。その際、観察対象の高周波源と電界イメージングシステムの基準周波数を同期する必要があるが、実用的な条件では、同期のためにケーブル等で接続することは現実的ではない。本研究では、波源から放射される電磁波をアンテナでも検出し、そこから局部発振周波数を生成し、観察対象へ電氣的な接続をすること無く高周波電界分布像が得られることを実証した。

本研究で開発した電界イメージングシステムは、従来の電気光学効果を利用した電界イメージング法に対して、感度を大きく低減すること無く高い時空間分解能と達成した。今後、本技術を発展させ、さらに高感度化することで、通信分野のデバイスやシステムの試験だけでなく、周波数領域での高周波電界イメージングを利用した様々な計測へ応用展開が可能であり、その成果は、学術的に新しい知見を見出していると判断され、審査委員一同は、本論文が博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認めた。