ミリ波電界撮像装置の高画質化

Millimeter-wave electric field imaging system based on parallel signal processing



笹川 清隆（Kiyotaka Sasagawa, Dr. Eng.）
奈良先端科学技術大学院大学　先端科学技術研究科
メディルクス研究センター　教授
(Professor, Nara Institute of Science and Technology)

所属学会：応用物理学会　電子情報通信学会　映像情報メディア学会　日本光学会　他
受賞：NAIST 学術奨励賞（2019 年）　応用物理学会 Poster Award（2018 年）　鈴木記念奨励賞（2011 年）　光学論文賞（2009 年）　応用物理学会講演奨励賞（2007 年）
研究専門分野：光エレクトロニクス　イメージセンサ　高周波電界イメージング　バイオメディカルデバイス

あらまし

第 5 世代以降の移動体通信では、ミリ波やテラヘルツ波といった超高周波帯の利用が想定されているが、この周波数帯では従来のプローブによる電界計測が難しい。本研究では、偏光イメージセンサと電気光学結晶を組み合わせたリアルタイム電界イメージングの感度と周波数範囲の拡張を目指した。2 重偏光子構造により高強度の光を照射できるようにし、偏光子の 3 層化と画素寸法の拡大によって感度を大きく改善した。画素配置に起因する空間分解能の低下や感度の不均一性は画像処理で補正した。さらに、25 GHz 信号の 4 逓倍による光変調を用いて 100 GHz 帯の電界の可視化を実証し、ミリ波近傍電界の動画像撮像にも成功した。今後は、性能向上と装置の小型化・簡便化により、高周波デバイスの評価手段としての実用化が期待される。

１．研究の目的

スマートフォンをはじめとする移動体通信は世代を重ねるごとに高速化しており、5G 以降ではミリ波（30～300 GHz）やサブミリ波・THz 波といった超高周波帯の利用が想定されている。この周波数帯では、伝送線路による信号の減衰が大きく、プローブを回路に接触させる従来の電界計測が困難となる。また、電波の指向性が高いため、ビームフォーミング技術*1 を用いて通信機器間に効率よく電波を照射する必要があり、刻々と変化する機器の状態をリアルタイムに計測することが求められる。

我々はこれまでに、フォトニクス技術を応用して回路近傍の電界を可視化するリアルタイム電界イメージング技術を開発してきた[1]。本研究では、これを発展させ、ミリ波から THz 帯の超高周波において回路近傍電界を高感度に検出するための基礎技術を開発する。具体的には、独自に設計する偏光イメージセンサ*2 と、画像処理手法を組み合わせ、リアルタイム電界イメージングの対象周波数を 100 GHz 帯まで拡張するとともに、従来法より 100 倍以上の高感度化を目指した。これにより、ミリ波から THz 帯で動作する高周波デバイスの動的な変化を可視化し、効率的な評価手法へ展開することが最終的な目標である。

２．研究の背景

高周波電界の可視化には、電気光学効果*3 を利用した計測が有力である（図 1）。電気光学結晶に電界を加えると屈折率が変化し、そこを通過する光の偏光状態がわずかに変わる。この変化を光学的に読み取れば、金属のプローブを使わずに電界を測定でき、測定対象の電界を乱しにくく、広い周波数帯域に対応できる。さらに、イメージセンサを用いれば多数の点の情報を並列に一括して取得できるため、電界の分布を画像として得ることができる。

電気光学計測で高周波電界を検出するには、観測対象と同期した局所発振（LO）光信号を生成し、光ヘテロダイン法*4 によって数十 Hz～1 kHz 程度の中間周波数*5 に変換する。LO 光信号の生成には、当初モードロックレーザーを用いる手法が開発されたが、強度ノイズが大きく発振条件も不安定であった。これに対し、光通信用の導波路型光変調器を用いることで安定性の

ミリ波電界撮像装置の高画質化

Millimeter-wave electric field imaging system based on parallel signal processing

高い光源を構築できることが示された[2-4]。しかし、従来の高周波フォトニクス技術には、広帯域ではあるが感度が低い、あるいは高感度化の手法をとると対応周波数が低く制限される、という課題があった。

一般に電気光学結晶へ照射する光を強くすれば信号は大きくなるが、イメージセンサの画素には飽和上限があるため、光強度を上げることには限界がある。そこで我々は、2 枚の偏光子を組み合わせて微弱な偏光回転を検出する 2 重偏光子構造を提案した[5,6]。本研究は、この構造を基盤として、偏光イメージセンサ、光変調、信号処理の各側面から感度の向上と周波数範囲の拡張を図ったものである。

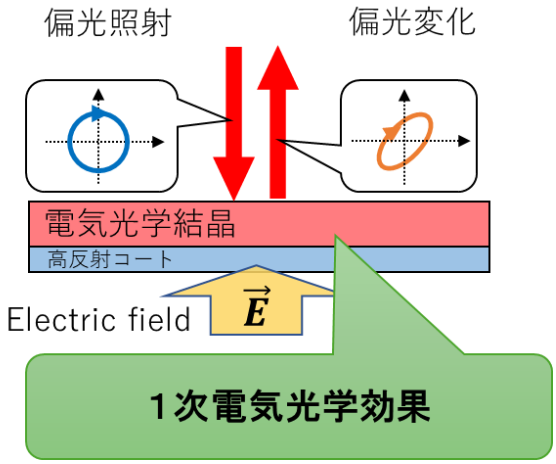


図 1 電気光学効果による電界検出の原理

3．研究の方法と結果

3.1 2 重偏光子を用いた電界イメージングシステム

本システムでは、電界センサである電気光学結晶に、第一の偏光子（一様偏光子）に対して不透過な直線偏光を照射する。結晶に電界が加わると偏光がわずかに回転し、その直交成分が一様偏光子を透過する。一方、回転しなかった成分は、現実の偏光子の消光比[*6]が有限であるためにわずかだけ透過する。本手法はこの透過成分を有効に利用する点に特徴がある。一様偏光子は入射光の強度を低減すると同時に偏光回転角を相対的に増大させるため、画素の飽和を回避しつつ、信号の変化率を大きくできる（図 2）。本研究では消光比が約 800 の偏光ビームスプリッタをこの一様偏光子として用い、信号対雑音比（SNR）の改善効果はその平方根である約 28 倍と見積もられる。

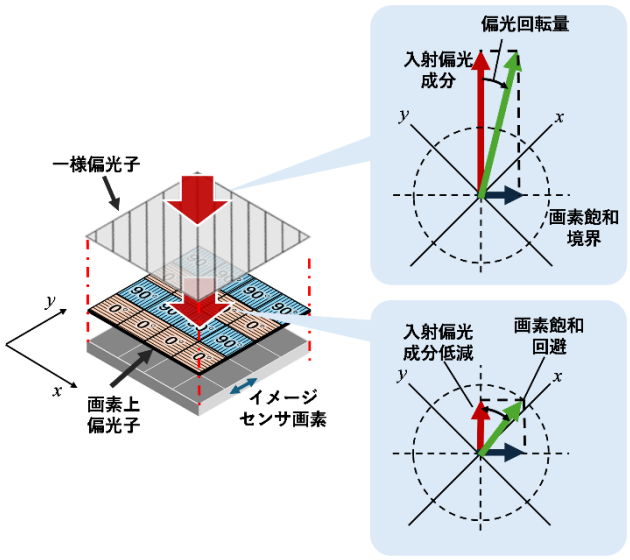


図 2 偏光イメージセンサを用いた 2 重偏光子構造

イメージセンサの画素上には、互いに直交する 2 種類（0 度、90 度）の偏光子を搭載した。偏光が回転すると両画素の出力は相補的に変化するため、その差分をとれば偏光回転量に比例した値が得られ、単一のセンサで差動検出を行って同相雑音を低減できる。装置構成を図 3 に示す。

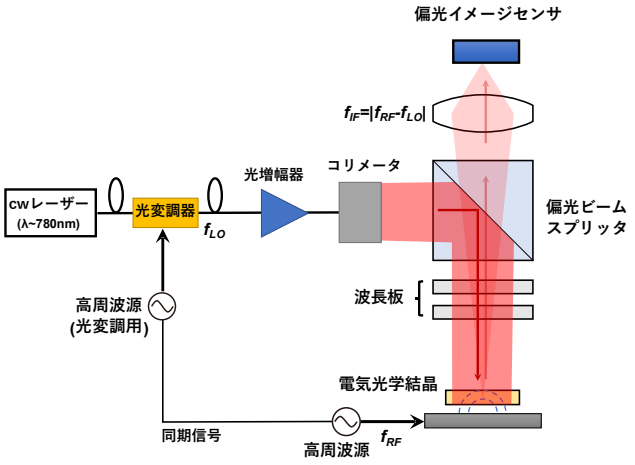


図 3 電界イメージング装置の基本構成

光強度変調器と光増幅器により高周波の LO 光信号を生成して十分な光強度に増幅し、電気光学結晶（主に ZnTe）に照射する。光源の波長は 780 nm 帯であり、この波長では Si フォトダイオードが感度を持つとともに、高速な光変調器や半導体光増幅器が利用できる。

結晶を往復した光は周波数 f_{LO} で強度変調、周波数 f_{RF} で偏光変調された状態となり、画素上偏光子で強度変調に変換されてミキシングされる結果、中間周波数 $f_{IF} = |f_{RF} - f_{LO}|$ の成分が現れる。f_{IF} をイメージセンサのフレームレートより低く設定することで、フレームレートよりはるかに高い周波数の電界分布をイメージセンサで撮像できる。

3.2 偏光イメージセンサの高性能化

画素上偏光子は、イメージセンサ製造に用いる CMOS 配線層をグレーティング状とし、ワイヤグリッド偏光子[*7]を作製した。本研究では、近赤外領域において受光特性の良い 0.35 μm プロセスを用い、多層化による偏光子の性能向上と製造誤差低減のためのレイアウト最適化を行った[7]。試作の結果、波長 780 nm ではライン／スペース = 0.7 μm／0.7 μm が最適な周期であることが分かった。1 層構造の消光比は 1.5 程度であったが、2 層目と 3 層目を積層すると目標の 3 以上を達成し、3 層構造では 5.7 まで改善された。その結果、3 層の偏光子は 1 層に対して約 3 倍の偏光検出感度を示し、消光比が無限大の理想的な場合の約 70%の感度に達した。偏光変化に対して出力が最も大きく変化する領域を用いるため、高い消光比を持たない多層偏光子でも高い性能が得られる。150 フレームの移動平均をとった偏光検出値の標準偏差は 9×10^{-5} 度であり、目標を上回る計測感度を確認した。

画素構造も改善した。初期の試作画素は寸法が 30 μm 角で、フォトダイオードは 15 μm であったが、画素寸法を 45 μm に拡大してフォトダイオードの間隔を最適化した結果、画素内の受光領域の割合(開口率)は 25%から 54%へと 2 倍以上に向上した。画素容量の増加により信号の増加は小さいものの雑音が低下し、画素飽和点付近の SNR は 30 μm 画素に対して約 5 dB 改善した。

3.3 画像処理による空間分解能と感度均一性の改善

偏光イメージセンサでは、直交する 2 種類の偏光画素が隣り合って配置されている。2 画素を一組として差分をとる処理では、2 画素が同じ位置にあると仮定するため、空間分解能は全画素数の半分となる。また、光の干渉などで面内の輝度分布が不均一になりやすく、電界の検出感度も不均一になる。これらを解決するため、0 度画素と 90 度画素の画像を分離して画素補完を行い、さらに直前までのフレーム平均像を用いて輝度補正を行う画像再構成手法を開発した。マイクロストリップライン線路の撮像では、画素補完によって空間分解能が改善し、輝度補正によって低感度領域が補われて線路上の電界強度がほぼ一定になるとともに、線路両側の電界分布の対称性も向上した（図 4）[8]。また、信号強度は積算フレーム数に比例し、雑音は積算数の平方根に比例して増えることから、積算によって SNR を向上できることを確認した。

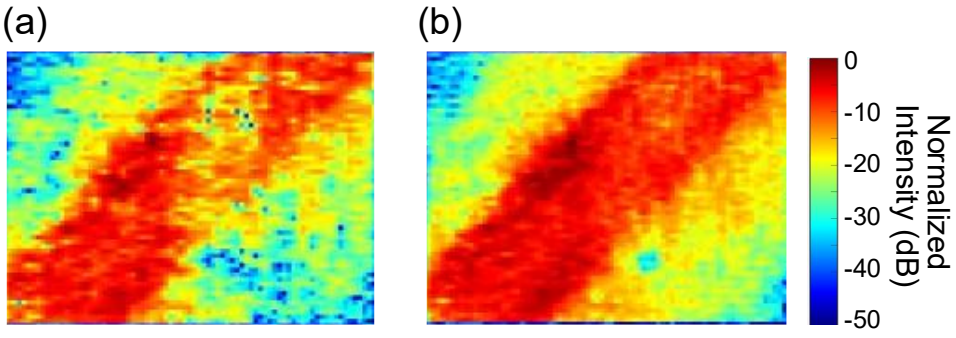


図 4　画像処理による空間分解能・感度均一性の改善(a) 単純な差分、(b) 画素補完＋輝度補正

ミリ波電界撮像装置の高画質化

Millimeter-wave electric field imaging system based on parallel signal processing

3.4　100 GHz 帯電界の観察と動画像撮像

導波路型光変調器の変調周波数は高々40～65 GHz 程度が上限であるため、100 GHz 以上の LO 光信号を生成するために逓倍変調＊8 を用い、25 GHz 帯の信号の 4 逓倍で 100 GHz 帯の変調を得た。強度変調器と位相変調器を直列に接続し、半波長電圧以上の電圧で駆動して高次の側帯波を生成する。位相変調器の併用により、0 次成分を高次側帯波と同程度以下に低減できることを光スペクトルの測定で確認した。波長は 785 nm とし、導波路のフォトリフラクティブ効果を避けるため変調器への入射光強度を数 mW に抑え、半導体光増幅器で変調光を増幅した。この系を用い、17.5 GHz の信号を 6 逓倍して 105 GHz とし、WR-10 導波管の端面開口から放射される電界を、面内方向の電界に感度をもつ(110)-ZnTe 結晶で観察したところ、105 GHz の電界の強度と位相の分布を明瞭に可視化できた（図 5）[9]。

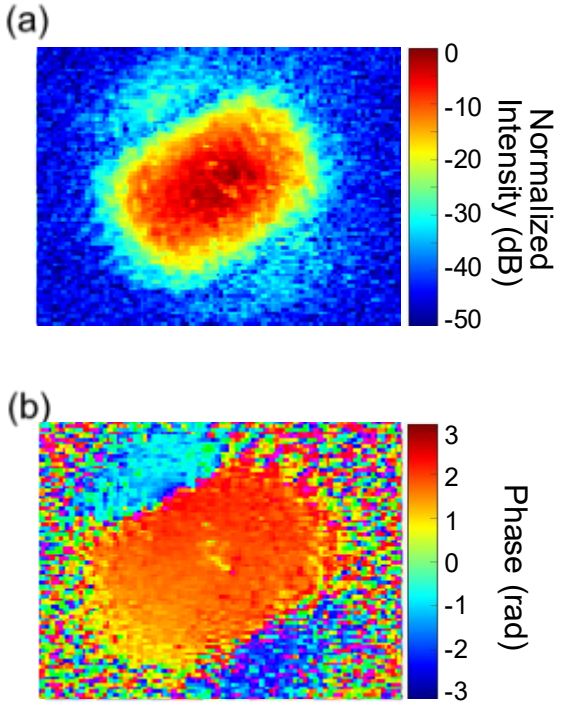


図 5　105 GHz 電界イメージング結果（WR-10 導波管端面）(a) 強度分布、(b) 位相分布

４．将来展望

本研究により、観察対象の高周波デバイスが発する電界の周波数に同期して、マイクロ波からミリ波までの電界を可視化する要素技術を確立した。現在の画素数は 100×110 であるが、技術的には画素数を増やして高解像度化することも可能である。

実用化に向けた最大の課題は装置の小型化と簡便化である。光学系やイメージセンサは比較的小型であり、大型となる主な要因は光源部分にある。観察対象に同期して動作する LO 信号用の高周波源、レーザー光源、変調器、光増幅器などを統合した小型モジュールを作製する必要があるが、近年の光電融合技術の進展により光デバイスの小型化が進んでおり、技術的には可能であると考える。

おわりに

本研究では、偏光イメージセンサを用いた電界イメージングの感度と周波数範囲を拡張する手法を開発した。2 重偏光子構造により画素飽和の制約下でもより強い光を照射でき、偏光子の 3 層化で約 3 倍、画素寸法の拡大で約 5 dB の SNR 改善が得られた。空間分解能と感度の均一性は画像処理で改善し、25 GHz 帯の信号源と 4 逓倍の光変調により 100 GHz 帯までの観察と、ミリ波近傍電界の動画像撮像を実証した。さらなる性能向上の余地も見いだされており、装置の小型化・簡便化と併せて、高周波デバイスの評価手段として実用化されることを期待している。

用語解説

*1 ビームフォーミング技術：複数のアンテナ素子の位相や振幅を制御して、電波を特定の方向に集中して送受信する技術。

*2 偏光イメージセンサ：各画素の上に偏光子を備え、光の偏光状態を画素ごとに検出できるイメージセンサ。

*3 電気光学効果：物質に電界を加えると屈折率が変化する現象。これを利用して電界を光の偏光変化として読み取ることができる。

*4 光ヘテロダイン法：周波数がわずかに異なる 2 つの信号を混合し、その差の周波数成分（うなり）を

取り出す手法。高周波信号を低い周波数に変換できる。

*5 中間周波数：光ヘテロダイン法で得られる、観察信号と局所発振信号との周波数差の成分。

*6 消光比：偏光子の透過率が最大となる偏光方向と最小となる偏光方向の透過率の比。偏光子の性能を表す。

*7 ワイヤグリッド偏光子：細い金属線を周期的に並べた構造で、線に平行な偏光成分を遮り、垂直な成分を透過する偏光子。

*8 逓倍変調：変調器を大きな振幅で駆動して高次の側帯波を発生させ、入力した信号の整数倍の周波数の変調を得る方法。

参考文献

[1] K. Sasagawa, A. Kanno, T. Kawanishi, M. Tsuchiya, "Live electrooptic imaging system based on ultraparallel photonic heterodyne for microwave near-fields," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 55, no. 12, pp. 2782-2791, 2007.

[2] K. Sasagawa, M. Tsuchiya, "Modulation depth enhancement for highly sensitive electro-optic RF near-field measurement," Electron. Lett., vol. 42, no. 23, pp. 1357-1358, 2006.

[3] K. Sasagawa, A. Kanno, M. Tsuchiya, "Instantaneous visualization of K-band electric near-fields by a live electrooptic imaging system based on double sideband suppressed carrier modulation," J. Lightwave Technol., vol. 26, no. 15, pp. 2782-2788, 2008.

[4] D.-J. Lee, M. H. Crites, J. F. Whitaker, "Electro-optic probing of microwave fields using a wavelength-tunable modulation depth," Meas. Sci. Technol., vol. 19, no. 11, 115301, 2008.

[5] R. Okada, K. Sasagawa, M. Haruta, H. Takehara, H. Tashiro, J. Ohta, "A polarisation-analysing CMOS image sensor for sensitive polarisation modulation detection," Electron. Lett., vol. 57, no. 12, pp. 472-474, 2021.

[6] K. Sasagawa, R. Okada, M. Haruta, H. Takehara, H. Tashiro, J. Ohta, "Reflective high-sensitivity polarization change imaging using a dual polarizer structure," Opt. Continuum, vol. 2, no. 4, pp. 758-768, 2023.

[7] R. Okada, K. Sasagawa, M. Mizuno, H. Takehara, M. Haruta, H. Tashiro, J. Ohta, "Improvement of on-pixel polarizer with 0.35-μm CMOS process for electro-optic imaging systems," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 62, no. SC, SC1052, 2023.

[8] K. Sasagawa, R. Okada, M. Mizuno, H. Takehara, M. Haruta, H. Tashiro, J. Ohta, "Enhancing image reconstruction method in high-frequency electric field visualization systems using a polarized light image sensor," Sensors, vol. 25, no. 5, 1596, 2025.

[9] K. Sasagawa, R. Okada, M. Mizuno, H. Takehara, M. Haruta, H. Tashiro, J. Ohta, "105-GHz electric field visualization by electro-optic imaging system using polarization image sensor," Proc. 54th European Microwave Conference (EuMC), pp. 628-631, 2024.

関連文献

R. Okada, M. Mizuno, T. Nagaoka, H. Takehara, M. Haruta, H. Tashiro, J. Ohta, K. Sasagawa, "Millimeter-wave band electro-optical imaging system using polarization CMOS image sensor and amplified optical local oscillator source," Sensors, vol. 24, no. 13, 4138, 2024.

R. Okada, M. Mizuno, H. Takehara, M. Haruta, H. Tashiro, J. Ohta, K. Sasagawa, "On-pixel polarizer structure for high-sensitivity millimeter-wave electro-optic imaging," Electronics, vol. 14, no. 20, 4026, 2025.

K. Sasagawa, R. Okada, M. Haruta, H. Takehara, H. Tashiro, J. Ohta, "Polarization image sensor for highly sensitive polarization modulation imaging based on stacked polarizers," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 69, no. 6, pp. 2924-2931, 2022.

R. Okada, M. Mizuno, H. Takehara, M. Haruta, H. Tashiro, J. Ohta, K. Sasagawa, "2.45 GHz

frequency-tracking electro-optic imaging using polarization CMOS image sensor," Proc. 2024 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 979-981, 2024.
K. Sasagawa, R. Okada, Y. Akamatsu, M. Mizuno, H. Takehara, M. Haruta, H. Tashiro, J. Ohta, "Exposure time control method for higher intermediate frequency in optical heterodyne imaging and its application to electric-field imaging based on electro-optic effect," Sensors, vol. 24, no. 4, 1249, 2024.

この研究の一部は、令和４年度ＳＣＡＴ研究助成の対象として採用され、令和５～７年度に実施されたものです。