

機関番号：14603

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20686027

研究課題名（和文） 超並列光ヘテロダイン法によるミリ波実時間映像化に関する研究

研究課題名（英文） Real-time visualization of millimeter wave based on ultra-parallel optical heterodyne method

研究代表者

笹川 清隆 (SASAGAWA KIYOTAKA)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号：50392725

研究成果の概要（和文）：

電界カメラによるミリ波電界分布の実時間観察を目的として、ミリ波帯の変調光生成手法の研究を行い、波長775 nm帯において100 GHzのミリ波変調光生成に成功した。この変調光を電界カメラに適用し、100 GHzの電界分布の実時間イメージングを実証した。また、電界イメージングの高感度化に向けて、偏光子搭載イメージセンサ画素を試作し、波長633 nmにおいて消光比42を達成した。さらに、検出信号の高効率な増幅のため、画素間の差動検出回路を試作し、高感度なミリ波実時間観察のための基礎技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：

To realize real-time imaging of millimeter wave electric field distribution by using a live electro-optic imaging camera, generation method of modulated light at a wavelength of 775 nm with a modulation frequency of 100 GHz is successfully developed. The modulated light is applied to the live electro-optic imaging camera and imaging of a millimeter wave electric field at 100 GHz is realized. In order to improve the sensitivity of electro-optic imaging, pixels for image sensor with polarizers is designed. The extinction ratio of 42 was achieved. For efficient amplification of detected signal, a differential detection circuit is designed. Through these researches, basic technologies for highly sensitive real-time millimeter imaging have been developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2009年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	19,100,000	5,730,000	24,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：電界計測・ミリ波・電気光学効果・光ヘテロダイン・イメージセンサ

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、研究代表者らは、フォトリソ技術によるマイクロ波帯電界カメラ技術を確立し、マイクロ波回路上近傍電界分布

像の実時間観察に他に先駆けて成功した。この技術は、研究代表者グループより提案された超並列光ヘテロダイン法に基づく世界唯一の独自手法である。他方、電界に対して感

度を有するプローブの走査により電界分布を静止画像として得る技術は複数機関において実現されていた。このようなプローブ走査型の電磁界分布計測は、EMC (Electromagnetic compatibility) 応用の例も報告されているが、走査に長時間を要するため、実時間動画化は不可能である。電界カメラ手法により映像取得に要する時間は飛躍的に短縮された。

一方、ミリ波の遠方電界分布観測技術は、東北大学(日本)や NHK(日本)、Sago Systems(アメリカ)より報告されていた。これらの装置の特色は、人体等から放射されるミリ波の検出を可能とする高感度特性であり、セキュリティ関連の応用を目指したものである。しかし、アンテナおよびアナログ高周波信号処理回路が必要なために、並列化を行うと移動が困難なほどの大規模装置となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、フォトニクス技術によりミリ波帯の遠方電界の実時間動画化を実現する他に無い装置を試作する。研究代表者らのグループは、これまでに画像の各点における光変調周波数を並列変換する超並列光ヘテロダイン法に基づくマイクロ波帯電界カメラ装置を作製し、電界を並列に計測することによって、周波数 10GHz までの電界分布を画素数 10,000 (100 × 100 画素)、毎秒 30 枚の動画として実時間表示することに成功している。本研究では、電界カメラの原理となる超並列光ヘテロダイン法においてミリ波帯の電界検出を実現することを目的とした。また、ミリ波電界検出においては、高空間分解能が必要となるため、プローブとして用いる電気光学結晶の厚さを低減することが求められる。そのため、高感度化のためにイメージセンサの高機能化を目指した。

## 3. 研究の方法

### ・ミリ波変調光の生成

ミリ波電界の実時間映像化においては光ヘテロダイン検波を行うため、ミリ波変調光源が必要となる。高周波変調は光通信で用いられているデバイスで可能であるが、その多くは、波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯用に設計されている。本研究で使用する CMOS イメージセンサは Si プロセスにより作製されるため、この波長帯の光を検出することはできない。そこで、1.55  $\mu\text{m}$  帯において変調後に第 2 高調波発生器によって波長変換する手法の研究を行った。理論検討により、波長変換後において不要周波数成分が低減される変調手法を明らかにし、実験によって原理実証を行った。

また、変調スペクトルの制御に光フィルタを用いないミリ波変調光生成手法について、

理論的な検討を行い、入れ小型のマッハ・ツェンダ干渉計構造を有するシングル・サイドバンド光変調器を用いて実現可能する手法の開発を行った。本手法では、変調光の変調周波数は入力信号の周波数に対して 4 通倍となる。

### ・ミリ波電界イメージング

開発したミリ波変調光を電界カメラに適用してミリ波電界のイメージング実験を行い、電界カメラのミリ波帯への拡張の実証を行った。

### ・電界カメラ高感度化を目指したイメージセンサの設計

従来の電界イメージングにおいては、外部の偏光子を用いて偏光変調を強度変調に変換していた。イメージセンサの画素アレイ上に画素毎に方向の異なる偏光子を搭載することで複数の点における偏光方向を一括して得ることができる。互いに直交する偏光子を搭載した画素間において、それぞれの出力を差動検出することにより、感度向上が期待される。先端の 65nm CMOS LSI プロセスの配線層を用いて金属グリッド偏光子を設計し、これを統合したイメージセンサを作製した。

また、高周波電界の電気光学結晶への印加による微弱な偏光変化を検出するため、画素間の差動検出を実現するイメージセンサの設計を行った。

## 4. 研究成果

### ・ミリ波変調光の生成

フィルタを用いたミリ波変調光生成の実験系を図 1 に示す。光変調器には、光通信に用いられる高速変調が可能な波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯用のものを用いた。変調器への入力信号は 25 GHz としたが、変調時に生成される高調波に着目し、光フィルタによって高調波成分を低減し、その後周期分極反転 LiNbO<sub>3</sub> (PPLN) 導波路を用いて第 2 高調波を生成する手法を提案した。

図 2 に生成された、変調光のスペクトルを示す。ミリ波帯である 100 GHz の周波数差が得られており、変調光生成に成功していることが示されている。

上記の手法では、光フィルタを用いているために、変調周波数の帯域がフィルタにより制限される。フィルタを用いないミリ波変調光生成のため、図 3 に示す実験系を構築した。

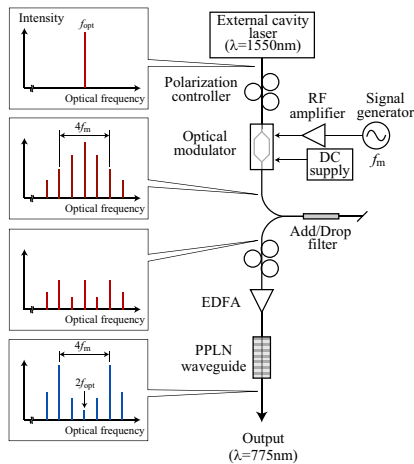


図1 ミリ波帯変調光生成の実験系.

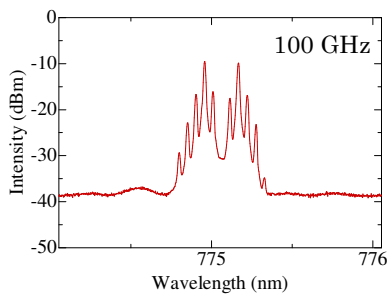


図2 100GHz 変調光のスペクトル.

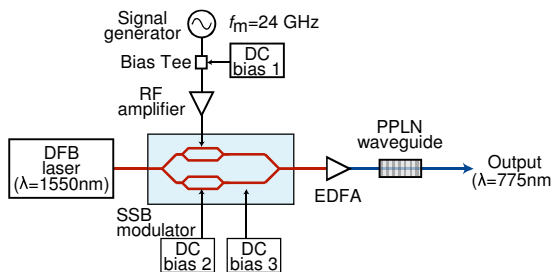


図3 フィルタを用いないミリ波帯変調光生成の実験系.

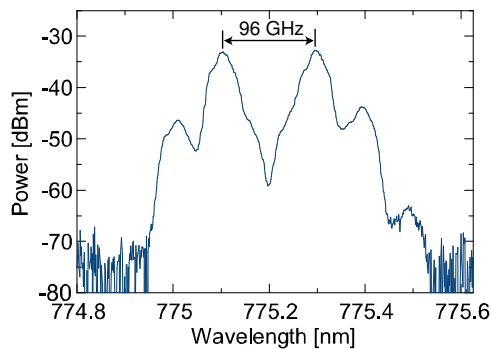


図4 生成されたミリ波帯変調光スペクトル

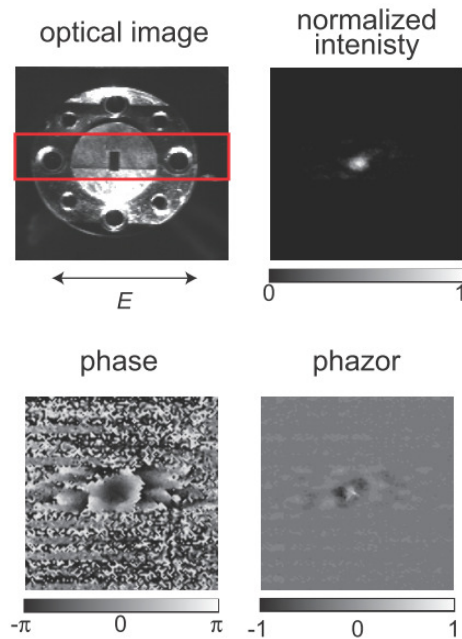


図5 ミリ波帯電界カメラの100GHzの電界イメージング結果.

図4に提案した実験系による変調光のスペクトルを示す. 本手法においてもミリ波帯 (96 GHz) の周波数差のピークをもつ変調光の生成に成功した. 本手法では, 不要なピークの強度も低減されており, より低雑音のイメージングができる可能性が示された.

・ミリ波電界イメージング

開発したミリ波帯変調光生成装置を電界カメラに組み込み電界イメージングを行った. 観察対象は, WR-10 導波管端面における 100 GHz の電界とした. 図5に観察結果を示す. 図中, optical image は同時観察した光学像であり導波管端面が確認される. 赤色の部分にプローブとなる電気光学結晶を配置しており, この領域の電界が観察される. normalized intensity は図中水平方向の偏光方向の電界強度を示している. 中央部が明るくなっており, 導波管から放射される電界のイメージングに成功していることが示されている. phase は位相情報を, phase は強度と位相をかけた情報を示しており, 電磁界が放射され広がっていることが示唆されている.

これらの結果のように, 電界カメラのミリ波帯への拡張に成功した.

・電界カメラ高感度化を目指したイメージセンサの設計

従来の電界カメラでは, 通常の CMOS イメージセンサを用いていた. 電界イメージング

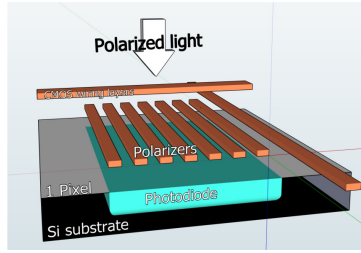


図6 CMOS センサ上の偏光子概念図

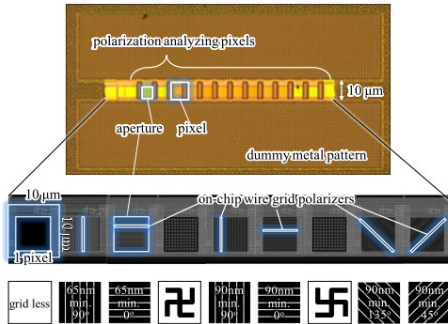


図7 偏光子搭載画素の試作回路写真

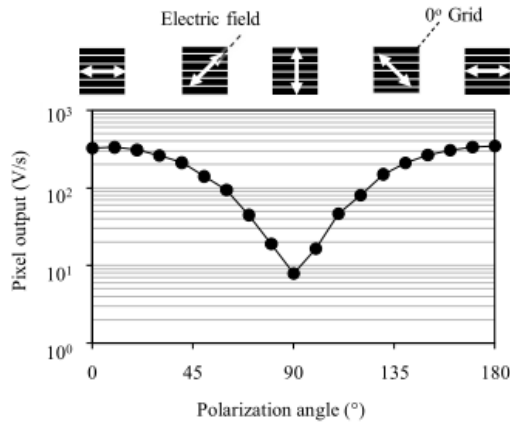


図8 偏光子搭載画素の偏光感度特性

においては、微弱な偏光変動を検出するため、CMOS センサ上に偏光子を搭載し、センサ内で信号増幅処理を行うことにより、感度向上が実現されることが期待される。本研究では、図6に示すような CMOS プロセスによる金属配線層を用いたグリッドを偏光子として利用する画素の試作を行った。図7に偏光子搭載画素の試作回路写真を示す。偏光子の方向は各画素毎に 0, 45, 90, 135 度から任意に選択することができる。図8に偏光子搭載がその変更感度特性を示す。入射光は超は 633 nm である。入射偏光角による検出信号の最大値と最小値の比から求められる消光比は 42 となり、偏光分光が可能な画素の試作に成功した。

互いに直交する偏光子搭載画素のペアに

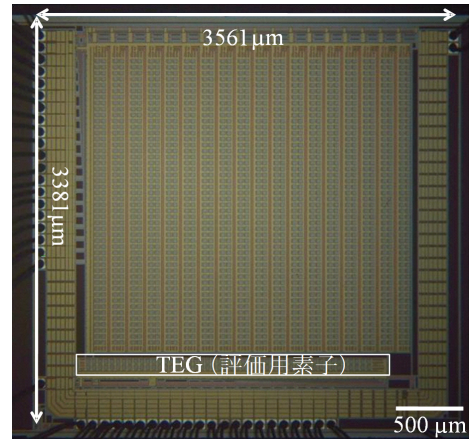
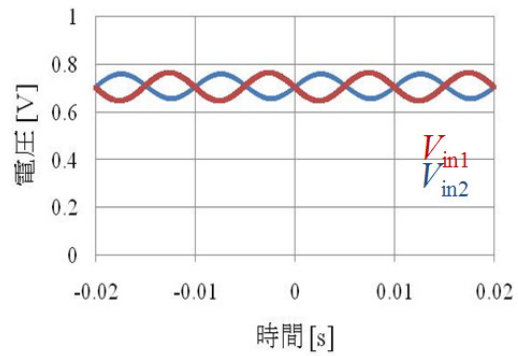
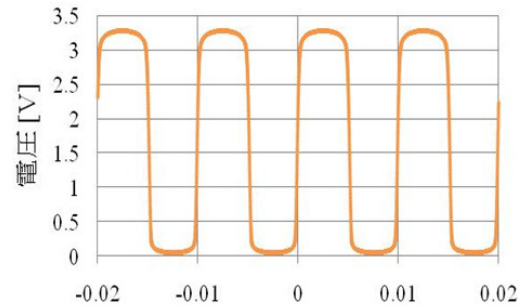


図9 差動検出イメージセンサ外観図



(a) 差動検出器への入力信号  $V_{in1}$ ,  $V_{in2}$



(b) 差動検出器出力

図10 差動検出器の入出力波形

対して、両偏光子に対して 45 度の直線偏光を入射し、偏光を回転させると、一方の信号は増加し、他方は減少する、相補的な信号が得られる。両者の差分をとって増幅することにより、高感度な信号検出が実現される。これを実現するための差動検出イメージセンサの試作を行った(図9)。

試作チップの評価を行い列間に配置した差動検出器により、差動検出ができる事を確認した(図10)。本センサを用いることにより、

電界イメージングの高感度化が実現されるものと期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① K. Sasagawa, A. Kanno and M. Tsuchiya, "Real-time digital signal processing for live electro-optic imaging," Opt. Express, 17, 15641-15651, 2009, 査読有
- ② K. Sasagawa and M. Tsuchiya, "Lithium Niobate Disk Sensor Using Photonic Heterodyning," Appl. Phys. Express, 2, 82201, 2009, 査読有

[学会発表] (計 11 件)

- ① K. Sasagawa, T. Noda, T. Tokuda, Jun Ohta, "W-Band Photonic Signal Generation Based on Frequency Doubling," Frontiers in optics 2010, FMI4, 2010.10.25, Rochester NY
- ② 宍戸 三四郎, 野田 俊彦, 笹川 清隆, 徳田 崇, 太田 淳, "65nm CMOS プロセスを用いた 偏光計測イメージセンサの性能向上", 情報センシング研究会, 2010.9.27, 機会振興会館, 東京
- ③ 宍戸 三四郎, 野田 俊彦, 笹川 清隆, 徳田 崇, 太田 淳, "65nm CMOS プロセスでの偏光計測イメージセンサの開発", 映像情報メディア学会, 2010.8.31, 愛媛大学, 愛媛
- ④ 藤原 正英, 笹川 清隆, 徳田 崇, 太田 淳, "電界イメージングの高感度化に向けた CMOS イメージセンサの設計," Optic & Photonics Japan 2009, 2009.11.24, 朱鷺メッセ, 新潟
- ⑤ K. Sasagawa, M. Fujiwara, T. Noda, T. Tokuda, J. Ohta, "Quadruple Frequency Photonic Signal Generation by Optical Frequency Doubling," OSA Annual Meeting 2009, 2009.10.12, San Jose, CA, USA
- ⑥ 藤原 正英, 野田 俊彦, 笹川 清隆, 徳田 崇, 太田 淳, "CMOS イメージセンサによる高感度電界イメージング," 日本光学会情報フォトンクスセンシンググループ秋合宿 2009.9.28 ウッディパル余呉 (滋賀県)
- ⑦ 笹川 清隆, 藤原 正英, 野田 俊彦, 徳田 崇, 太田 淳, "第二高調波発生による 4 通倍光 2 トーン信号生成," 応用物理学会, 2009.9.11, 富山大学, 富山

- ⑧ K. Sasagawa, A. Kanno, M. Tsuchiya, "W-band photonic signal generation with carrier and unnecessary sidebands suppressions by second harmonic generation," The 25th Progress In Electromagnetics Research Symposium, 2009.3.23, Beijing, China
- ⑨ 藤原 正英, 笹川 清隆, 徳田 崇, 太田 淳, 土屋 昌弘, "電界カメラに向けた差動検出イメージセンサの設計," 電子情報通信学会 総合大会, 2009.3.17, 愛媛大学, 愛媛
- ⑩ K. Sasagawa, A. Kanno, M. Tsuchiya, "W-band photonic signal generation with carrier and unnecessary sidebands suppressions by second harmonic generation," The 21st Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society, 2008.11.11, Newport Beach, CA
- ⑪ K. Sasagawa, A. Kanno, M. Tsuchiya, "V-band Signal Generation by Photonic Frequency Doubling with Periodically Poled Lithium Niobate Waveguide," the 2008 IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics, 2008.10.2, Gold Coast, Australia

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://mswebs.naist.jp/LABs/pdslab/index-j.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹川 清隆 (SASAGAWA KIYOTAKA)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号 : 50392725