

平成30年12月26日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13984

研究課題名(和文)半導体イメージセンサの熱雑音を用いた赤外線レーザービームプロファイラの開発

研究課題名(英文) Infrared Laser Beam Profiling Technique using Thermal Noise in Semiconductor Image Sensors

研究代表者

沼田 孝之 (Numata, Takayuki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：60420288

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：半導体イメージセンサの暗電流を用いた赤外線レーザービームプロファイル評価技術の開発に取り組んだ。半導体が光励起感度を持たない波長10.6 μmの炭酸ガスレーザーを用い、パワーとビーム径を事前に定量化して、イメージセンサ受光面をスポット加熱し、熱励起したキャリアを各画素で空間的に離散化して画像として検出する。実験の結果、入射レーザーのビーム径と相関のあるスポット状の信号分布が検出され、新規な赤外線レーザービーム形状評価技術としてのポテンシャルを示す成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：A novel measurement technique of infrared laser beam profile using thermally excited carriers in semiconductor image sensor has been proposed and demonstrated. A mid-infrared laser beam from a carbon dioxide laser with known radiant power and beam size are locally irradiated on sensitive area of a silicon-based image sensor. Thermally excited carriers are detected by corresponding pixels and compose a beam spot-like image. Ratio of 1/e² diameters between incident laser and detected signals among different size of incident laser beam showed their good correlation. The result shows a strong potential of this proposed method as a new measurement technique for infrared laser beam.

研究分野：レーザー放射計測

キーワード：赤外線 レーザ ビームプロファイル イメージセンサ

1. 研究開始当初の背景

環境ガスのリモートセンシングや生体組織の高感度検出、物質同定や顕微分析技術等を可能にする、数 μm ~数十 μm の中遠赤外波長域のレーザ応用技術に期待が集まっている。いずれの応用においても、ビームスポットの整形による照射フルエンスの定量評価が不可欠であり、ビーム断面の光強度分布(ビームプロファイル)の計測が重要な技術課題の一つといえる。特に、量子カスケードレーザ等の台頭によって応用技術の実用化が近づき、当該分野は今後、学術面のみならず産業的にも大きな進展が期待されることから、この波長域におけるビームプロファイルの計測技術の重要性は益々増大すると考えられる。ところがこの中遠赤外線領域では、可視光領域と比較してビームプロファイルの計測技術が発達途上である。現状で、焦電センサや熱電対、ボロメータ等の感熱素子をアレイ化した機器が存在するが、いずれも可視光用 CCD 等と比較し、画素の微細集積化・大面積化が進んでいない。さらにコスト等もネックとなりユーザが導入しにくい状況といえる。このことから、中~遠赤外線レーザ応用の現場では、入手し易く簡便で高精度なビームプロファイル測定技術が求められている。

2. 研究の目的

光半導体イメージセンサにおける温度に由来する暗電流信号を利用した、中~遠赤外波長に対応可能なレーザビームプロファイル測定技術を開発する。具体的には、赤外線レーザをセンサ表面に照射し熱キャリアをスポット的に励起する。熱励起したキャリアを各画素にて空間的に離散化して検出し画像として取得する新たな測定法に挑戦する。入射ビームプロファイルと熱によるキャリア励起・検出特性の相関を評価し、新規な赤外線ビームプロファイル評価法の確立を目指す。

3. 研究の方法

まず、半導体イメージセンサの温度に対する信号振幅を評価して、熱に由来する信号を検出するという本研究提案の原理を基礎的に検証する。その後、赤外線レーザを用いた照射実験に取り組む。信頼性を確保する為、センサに照射するレーザ光は、レーザパワーとビームサイズを事前に定量化しておく。高いS/Nを確保するため、レーザ光をセンサ表面で効率的に熱に変換する光熱変換材料の成膜方法や、本研究においては「ノイズ」と位置付けられる可視光由来の信号の低減策について工夫・検討を行う。最後に、既知のパワーとビーム径を持つ赤外線レーザ光をセンサに照射し、得られる画像(暗電流信号分布)からレーザスポット形状との相関を評価し、ビーム形状計測技術としての可能性を

議論して本研究を総括する。

4. 研究成果

研究ではまず、恒温槽内で市販の可視光用 CCD センサの表面温度に対する暗電流信号を評価することで提案原理の妥当性を評価した。保護ガラスを取り除いたセンサ表面に Pt100 白金抵抗測温素子をエポキシ系接着剤で固定したサンプルを製作した(図1)。これを恒温槽内に設置し、周囲温度を上下させつつ表面温度とセンサの出力(全カウント値)を記録する。サンプルとして用いた CCD は、露光時間を 1/125 秒、0 dB の固定ゲイン、Si 基板ベースで 1/2 インチインターライントランスファ型、38 万画素のものである。

図2に結果を示す。横軸はセンサ表面温度、縦軸は全カウント値である。表面温度に対し正の相関を示す信号振幅が得られ、温度情報を、イメージセンサを通じて読み取ることが可能とわかる。信号レベル(全カウントを画素数で割った平均カウント値)は 2.6 と小さい。このため原理的には指数関数のアレニウス則に支配される熱励起過程を経つつも見かけ直線的な特性が得られているものと考えられる。

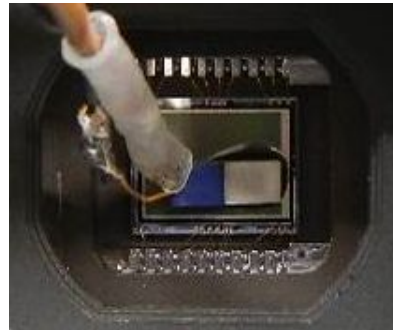


図1 CCD センサ表面温度モニタ

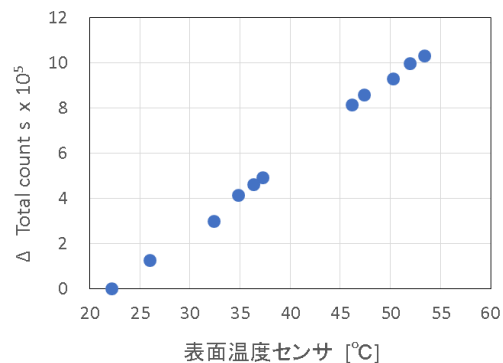


図2 センサ表面温度と信号振幅

以上の基礎評価から、半導体イメージセンサにおける熱励起信号検出の可能性が示唆された。そこで、次に熱源としてイメージセンサが光励起感度を持たない波長 10.6 μm の炭酸ガスレーザを導入し、これをイメージセンサの表面に照射するレーザ加熱実験系を構築した(図3)。レーザから出射した光に

は赤色 LD を重畳させ、イメージセンサ表面へのアライメントの精度を確保している。コリメータを通して並行光としたのち、アテネータによりパワーレベルを調整してシャッタにて ON/OFF する。また、レンズ ($f=300$) によりセンサ表面における照射スポット径を可変できる装置構成とした。

イメージセンサ表面のレーザ加熱スポットと、励起された暗電流信号の分布の相関を評価するには、加熱用レーザのビームサイズの定量化が重要である。本研究では、ビーム形状計測の ISO 規格に準じた手法をベースにビーム直径の評価を行った。直径 100 μm の金属製ピンホールをサーモパイルセンサ前面に拡散板を介して取り付けたものを検出ユニットとし、これをビーム断面内に配置してステップモータステージにより走査することで、ビームプロファイルを評価した。その結果、前述の集光レンズの着脱によってイメージセンサ表面におけるスポット径は 1.4 mm および 2.7 mm と設定されることを確認した。また、実験装置では、上記レンズ通過後 50 : 50 のビームスプリッタにより光路を二手に分岐し、一方を評価対象のイメージセンサ、もう一方を上記ビーム形状検出ユニットおよびパワーメータに誘導している。特に、イメージセンサ受光面とピンホール面を等距離に配置することで、熱励起キャリア検出中のレーザスポット径を同時にモニタ出来るようにした。

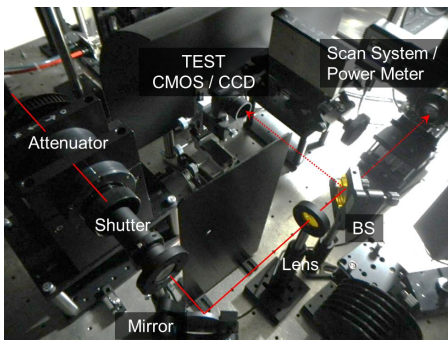
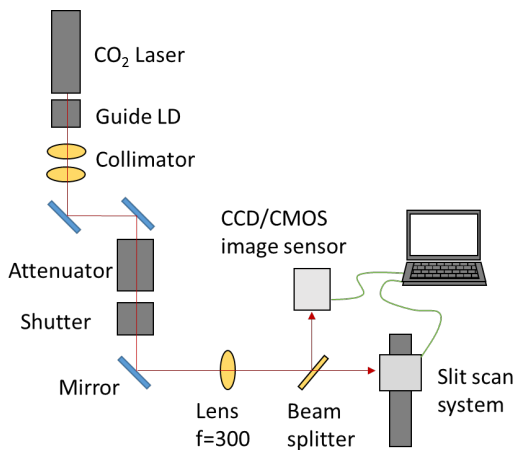


図 3 実験系の概略図 (上) と外観 (下)

評価対象とする半導体イメージセンサは一般に表面に金属配線層が存在する構造であることから、これが赤外線レーザ光を反射し光熱変換を妨げることが考えられる。そこで、評価対象の一部のセンサは、ノイズ源となる可視光を遮断しつつ赤外線レーザ波長に対し高い吸収を示す黒体塗料をセンサ表面に塗布することで効率的に光熱変換する構造とした。

赤外線レーザ照射実験は、まず上記の黒体塗膜を形成した CCD センサを用いて行った。高輝度なハロゲンランプ光源を用いた迷光評価テストでは、検出信号レベルに変化を起さず、塗膜は十分な厚さで形成され可視光を確実に遮断できていることを確認した。しかし、赤外線レーザの照射に対して黒体塗膜は光熱変換効率に優れる一方で耐熱性に問題があり、レーザスポット照射で容易に損傷が生じた (図 4)。本アプローチでは塗膜の損傷により測定の再現性の確保が難しく、また期間内での塗膜の耐久性の改善も難しいと考えられた。

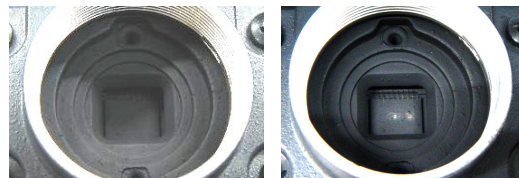


図 4 黒体塗料でコーティングした CCD センサの外観 (左) と炭酸ガスレーザのスポット照射で生じた損傷 (右)

そこでつぎに、黒体塗料を用いず、センサ面に直接赤外レーザ光を照射するアプローチに取り組んだ。特に、センサに温度制御機構を設け、センサ自身の電力消費に伴う熱励起信号等レーザ加熱以外の信号源を抑制しつつ、照射レーザパワーを高出力化 (2 W 以上) することで S/N 改善を図った。構造上センサ表面が環境に露出することから可視光が背景ノイズとなることが想定された。そこでセンサ受光部にゲルマニウム製の窓を配置し、可視光を遮断するようにした。照射実験はモノクロ CMOS センサを用い前述と同様の条件で受光部の中央に集光ビームスポットを照射する形態である。

実験の結果、イメージセンサ上のレーザ加熱位置においてスポット状の信号を検出した。図 5 は、レーザパワー 3 W、照射ビーム直径 1.4 mm、および 2.7 mm の照射に対しレーザ照射開始 20 秒後に検出された画像である。センサの露光時間は約 1 s に設定している。いずれのビームサイズの照射に対してもセンサ中央部に信号レベルの増大が確認される。ビーム照射位置をセンサ面で移動させるとこの明点の位置も同じように移動する。図 6 は、同画像から抽出した信号分布の

断面プロットである。縦軸は使用した 8 bit の CMOS センサの信号出力、横軸の距離はセンサのピクセルサイズから換算している。

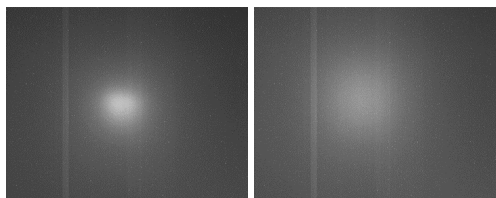


図 5 赤外線レーザーによる熱励起画像、ビーム径 1.4 mm (左) 同 2.7 mm (右)

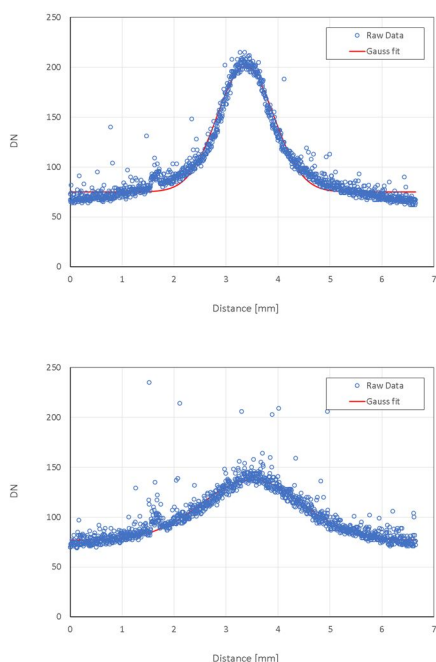


図 6 断面プロファイル 1.4 mm レーザ照射時 (上) 同 2.7 mm (下)

上記断面プロファイルをガウス関数でフィッティングし $1/e^2$ 幅を求め、先に測定した照射レーザービーム径に対する比を導出することで、レーザースポット径と画像信号との相関を評価した。その結果、入射ビームサイズの大小に依らず、約 1.5 という係数が得られ双方の強い相関を示す結果が得られた。上記検出信号が可視光に由来しないこと検証する為、測定系を暗箱で覆い、ゲルマニウム窓を外した状態でセンサ表面をデジタルカメラで観察しつつ同様の実験を行った。その結果、センサ表面のレーザースポットにおいてカメラの感度レベルでは可視光は検出されず、上記検出信号が熱励起に起因する暗電流であることを示す結果が得られた。さらに、照射時間が長くなるにつれ、入射レーザー径と暗電流スポット径の乖離が進む(係数が大きくなる)傾向が見られた。これは、レーザー照射の継続によりセンサ全体の温度が上昇し画素の一部が飽和レベルに達することが一因

と推察される。ただし、レーザー照射を停止し、センサを一定時間冷却すれば、再び同様の測定が可能であった。またパワー密度 500 W/cm^2 という高強度レーザースポットの繰り返し照射を経た後でもイメージセンサ表面のダメージは確認されず、良好なデータ再現性が得られた。これは本提案手法の中赤外波長レーザーのビームプロファイル測定への可能性のみならず高パワーレベルのビーム測定への適用可能性をも示す重要な結果といえる。

ところで本提案原理では、熱励起信号のレベルが微弱である場合、イメージセンサ本来の感度領域である可視～近赤外波長の光が僅かに入射しても信号に重畳しビームプロファイル評価の誤差要因となることが想定される。そのため研究では、前述の熱励起暗電流検出実験に取り組みつつ、可視～近赤外波長域におけるイメージセンサのノイズ(感度ムラ)の評価も並行して進めビームプロファイル測定誤差の検討も合わせて行った。具体的には、CCD 型センサに特有の励起波長と露光時間に応じた感度ムラの発生原因について、「電荷漏えい効果」に着目し理論・実験の両面から検討を行った。実験では、積分球を用いた均一性の高い光照度場をいくつかの波長で構築し、そこへ CCD センサを暴露することで感度の不均一性を浮かび上げさせ評価する測定系を構築した。検出信号(全画素信号の総和)の露光時間に対する非直線性を波長ごとに評価し、電荷漏えい効果の理論曲線をフィッティングすることで、感度ムラと電荷漏えい効果の相関を議論した。代表的な評価例を図 7 に示す。

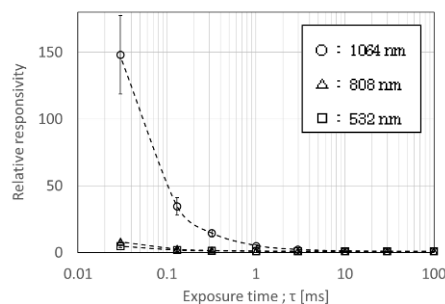


図 7 電荷漏えい効果の波長依存性

プロット○、△、□ はそれぞれ波長 1064 nm、808 nm、532 nm におけるデータ、鎖線は電荷漏えい効果の理論曲線を示す。この結果から、感度の不均一性を生じた CCD の信号特性は、電荷漏えい効果の理論曲線によくフィットすること、即ち、感度ムラの物理的背景として電荷漏えい効果の存在が強く示唆されることが読み取れる。研究ではさらに、こうした CCD の感度ムラが、ビームプロファイル測定の精度に与える影響についても評価した。図 8 は、波長 $1.06 \mu\text{m}$ 、直径 2.5 mm ($1/e^2$ 、スリット走査法にて事前評価) のレーザー光を CCD 型ビームプロファイラに入射させ、露光時間毎にビーム径測定値を比較したもので

ある。露光時間の短縮と共にセンサの感度ムラの影響が測定結果に顕在化することがわかる。すなわち露光時間を長く確保することでビーム径の測定誤差を抑制することが可能であるといえる。

本研究ではこうした半導体イメージセンサの感度特性の基礎検討を通じ、熱励起した暗電流信号の検出に加え、同様の光半導体センサを扱う可視～近赤外波長のレーザービームプロファイラの実用においても信頼性確保の観点から重要といえる技術ノウハウを同時に蓄積した。

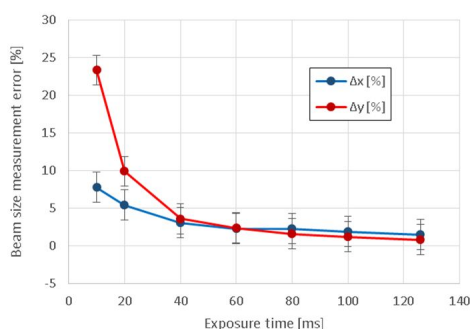


図8 CCD ビームプロファイラにおける露光時間とビーム径測定誤差

以上、本研究助成課題では、半導体イメージセンサの暗電流を用いた赤外線レーザービームプロファイル評価技術の開発に取り組んだ。その結果、入射赤外線レーザーのビーム径と相関のある信号分布を検出し、新たな赤外線レーザービーム形状評価技術としての可能性・ポテンシャルを示す成果が得られた。同時に、半導体イメージセンサの感度特性について実験・理論的検討を行い、産業応用の面でも重要なビームプロファイル測定の信頼性確保に向けた技術知見を獲得することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

T. Numata, M. Tanabe, K. Amemiya, and D. Fukuda, "Response Non-Uniformity of Beam Profiling Cameras at Near-Infrared Laser Wavelength", Appl. Opt. 56, 5972-5977, 2017. (査読有)

〔学会発表〕(計 1 件)

沼田 孝之, ビームプロファイラ用 CCD カメラにおける感度不均一性の発生要因に関する検討, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月 19 日, 早稲田大学, 東京都新宿区.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

沼田 孝之, 赤外線レーザーのビームプロファイルの測定方法及び測定システム, 特願 2018-200032

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沼田 孝之 (NUMATA, Takayuki)

(国研) 産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号: 60420288

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし