

論文内容の要旨

氏名 Nguyen Hoang Dung^{ぐん ほん どうん}

学位の種類 博士(工学)

学位記番号 工第190号

学位授与の日付 平成23年6月15日

学位授与の要件 学位規程第5条第2項該当

学位論文題目 Evaluation of 16 Mfps 165Kpixel High Sensitivity CCD Image Sensor and its Application
(1,600万コマ/秒 165,000画素の高感度 CCD 撮像素子の評価と応用)

論文審査委員 (主査) 教授 江藤 剛 治

(副主査) 教授 中野 人 志

(副査) 教授 竹原 幸 生

1990年代の初めから、江藤教授と共同研究者たちは高速度ビデオカメラの開発を続けてきた。1991年に4,500コマ/秒で撮影できるビデオカメラを開発した。並列・部分読み出しと、デジタルメモリー上への連続上書き記録を併せ持つことにより、当時の世界最高速度を可能にした。この基本構成は、その後の高速度ビデオカメラのデファクトスタンダードになった。

2001年に100万コマ/秒(1 Mega frames per second (1 Mfps))で撮影できる表面照射(Front-side Illuminated (FSI) 撮像素子を開発した。撮影操作の間は、全面素で同時に、各画素の直線その場 CCDメモリー (Linear In-situ CCD Memory) に記録される。この究極の並列記録処理が超高速撮影を可能にした。それゆえ、この素子は画素周辺記録型撮像素子バージョン2 (In-situ Storage Image Sensor Version 2 (ISIS-V2))と名付けられた。ISIS-V2による撮影ではすぐに、細胞撮影やナノ/マイクロ技術の撮影では感度不足となることがわかった。

非常に高い撮影速度と感度とともに、裏面照射 ISIS (Backside Illuminated ISIS (BSI-ISIS))の非常に重要な特徴である。私たちはBSI-ISISビデオカメラのより高い性能を達成するために、シミュレーションと実験とともに、新しいアイデアを導入してこの撮像素子の設計を改良してきた。

本論文の最初の部分は最初のBSI-ISISであるISIS-V12の設計と評価の結果について紹介している。このビデオカメラは最高速では100万コマ/秒(1 Mfps)である。ISIS-V12の感度は表面照射であるISIS-V2のその約10倍である。この素子の評価結果は以下のとおりである。

(1) 赤(650nm)、緑(532nm)、バイオレット(405nm)レーザー光に対する量子効率率はそれぞれ32.1%、25.6%、1.37%である。しかしこのテストセンサーには量子効率を上げるための標準裏面処理プロセスがまだ適用されていない。したがって標準裏面処理プロセスをこのセンサーに適用するならば、通常の裏面照射素子と同程度の量子効率80%、すなわち10個の光子入射に対して8個の信号電子の生成を期待することができるであろう。

(2) ISIS-V12の信号取扱い容量 Q_{max} は約 $10,000e^-$ でトータルノイズレベルはわずかに $9e^-$ である。このビデオカメラはフルダイナミックレンジ10 bitsでは25万コマ/秒(250 kfps)で撮影できる。より高速度撮影では Q_{max} の低下のためにダイナミックレンジが下がる。

(3) この素子にはCharge Carrier Multiplication (CCM)が裏面照射と冷却とともに導入されており、これにより、 $5e^-$ 以下という非常に低い画像信号検出レベルを達成した。

各画素内の電子の移動時間は以下の手段で効果的に低減され、最小化されている。すなわち、非常に低くスムーズに変化する濃度分布を持つ n と p 型の 2 重エピタキシャル層を持つ特殊ウエーファと、コレクショングートの設計に曲線設計を適用している。この 2 つの技術を組み合わせて用いることにより、移動速度の合計を 10ns 以下にドラマチックに低減する。すなわち電子の移動時間という観点からは、1 億コマ/秒が可能となる。さらに稲妻バスライン技術と超高速撮影のための裏面照射を導入することにより、ダイナミックレンジを減らすことなく 20 Mfps を達成することができる。

次の部分では、BSI-ISIS の次のバージョンである ISIS-V16 の評価結果を紹介している。ISIS-V16 の設計は高速化のための金属配線を除いて ISIS-V12 のそれと完全に同一である。このプロトタイプカメラの驚嘆すべき結果は以下のようにまとめられる。

(1) 撮影速度

ISIS-V16 カメラは 8 fps から 1,600 万コマ/秒 (16 Mfps) で動くことができる。私たちは現在、より高い速度で動かすためにサブシステムの改善に努力している。

(2) 取扱い信号容量

ISIS-V16 の取り扱い信号容量は 15,000e⁻である。ISIS-V16 ビデオカメラはフルダイナミックレンジで 8 Mfps で動き、16 Mfps では取扱い信号容量の減少のためにダイナミックレンジが少し落ちる。

(3) ノイズ評価

最も重要な評価項目の一つはノイズの評価である。これは以下のようにまとめられる。

(a) ノイズ対読み出し時間

読み出し時間の計算値は 12 秒である。ISIS-V16 カメラの実際の読み出し時間は 20 秒もかかっている。このため暗電流ノイズが画像の周辺から中心に向かって現れている。このノイズの影響を減らすには、読み出し速度をはるかに早くして読み出し時間をはるかに小さくする必要がある。

(b) ノイズ対温度

ノイズは温度に依存する。ノイズレベルは 10°C 下がるごとに 1/2 に減っている。-40°C まで下げると、平均ノイズレベルは 25e⁻まで下がる (この値は画像の水平中心線沿いに測ったものである)。

(c) ノイズ対撮影速度

-50°C では、30 fps から 16 Mfps までノイズレベルは撮影速度に依存せず約 36e⁻であった。最初は ISIS-V16 評価カメラは駆動電圧を制御するために非常に長い配線を伴ったたくさんの電力供給源を使っていた。そのためノイズレベルは ISIS-V12 のその約 4 倍であった。配線を最適化した電源ボードを使えば、最後には、ノイズレベルは ISIS-V12 のそれと同レベル、すなわち 10e⁻以下に下がるであろう。

(d) ドライバー回路からの電磁ノイズ

画面上のノイズの形状は正確にストライプ状である。このストライプノイズは一定の場所にとどまらず一定の速度で移動する。また撮影速度の増加に依存する。この結果から、最も可能性が高いのは制御回路で生成される周期的な電磁ノイズであろう。

(e) CCM を使う時のアンプ部のノイズ

アンプの設計はトランジスタ構造である。ホットエレクトロンは 2 次電子を生成し、電子の数はより増える。電子とホールの再結合が近赤外線を発生する。このノイズを減らす方法として提案されるのは、トランジスタのドレーングートの下の Lightly Doped Drain とドレーングートの電圧の調整である。

(4) 移動可能なプロトタイプ化のためのカメラの改良

ISIS-V16 システムを単純化する努力の中で、私たちは FPGA を 1 個除くこと、大きな電源を小型化すること、そして冷却システムをペルチェ冷却にすることに決めた。

本論文の最後の部分は、ISIS カメラの適用例である。この例は粘着テープを急激にはがすときのスティックスリップ構造への適用例である。

粘着テープを急激にはがす実験は非常に単純であるが、単一グラフエン片の作成と分析で使われた技術であり、ノーベル賞の対象となった。超高速ビデオカメラで撮影することにより、以下のことがわかった。

(1) 粘着テープがはがれるとき、連続的にはがれるのではなく、周期的かつ不連続的に、いわばピッピッとステップ的にはがれる現象の繰り返しとなっている。そのため各ステップではがれる瞬間には非常に大きな引っ張り力が働いている。

(2) このようなステップ的な繰り返しによりはがれる現象は、層構造をなす場合があり、この場合は、1 ステップの中にさらに小さい、より速いステップの周期的な構造を含んでいる。

以上のように開発した超高速ビデオカメラにより、これまで知られていなかった様々の重要な現象が発見、解明されることが期待される。

1. 経緯

近畿大学では2001年には100万コマ/秒のビデオカメラを開発した。しかし機軸速度が上がるに従って、感度の不足が実用上の最も大きな課題となってきた。とくに画素周辺記録型撮像素子は超高速化には適しているものの、CCDメモリー部を遮光しているので開口率が13%~15%と低く、感度向上には不利であった。そのため開口率が100%になる裏面照射構造とし、表面側に画素周辺記録構造を作り込むことにした。

ただし表面側にメモリーを持たない通常の裏面照射素子構造であると、裏面に入射した光が表面側のメモリー領域まで届き、偽信号を生成する。また表面のメモリー領域に信号を保存中に、裏面付近で生じた信号電荷もメモリー領域に迷入する。したがって特殊な裏面照射撮像素子構造を実現する必要があるがあった。

本論文の提出者 Hoang Dung Nguyen 氏は、この新規裏面照射撮像素子の開発時期に合わせて近畿大学研究員に赴任し、その実現のための設計と、試作された素子の評価にあたった。本論文ではその間得られた学術的技術的成果が報告されている。

2. 特殊裏面照射素子構造と著者の役割

最初に試作された裏面照射超高速撮像素子は ISIS-V12 である。ISIS は In-situ Storage Image Sensor (画素周辺記録型撮像素子) の意味であり、V12 は Version 12 を意味している。それを改良したものが V16 である。この二つのセンサーの違いは以下の通りである。

(1) ISIS-V12

原理実証素子である。すなわち裏面から入射した光の表面側のメモリー領域への直接入射と生成した信号電荷の迷入を防ぎ、かつ信号電子が表面側の Collection Gate に効率よく集まり、メモリー領域に転送されることを実証することが目的であった。

Nguyen 氏は ISIS-V12 の評価カメラのセットアップと評価実験を担当した。

(2) ISIS-V16

ISIS-V12 の裏面側に標準裏面プロセスを加えるとともに、さらなる超高速化のために表面側の金属配線の設計を全面的に変更している。裏面照射は通常、高感度化のために適用されるが、実は高速化に対しても有利である。すなわち裏面側の開口率の低下が全く生じない。また表面照射撮像素子では、各画素に同一条件で光を入射させるために、画素上の電極や配線構造は一様でなければならない。裏面照射ではこのような制約を受けずに表面側全面に自由に金属配線を張り巡らせることができる。

Nguyen 氏は ISIS-V16 については設計の一部を担当するとともに、試作素子の評価カメラのセットアップと評価実験を担当した。

3. 成果の概要

(1) 超高速化のためのシミュレーションによる検討

まずこの BSI-ISIS の撮影スピードを上げるためのキーテクノロジーが議論されている。シミュレーションにより、各画素内の電子の移動時間は以下の手段で効果的に低減

され、最小化されることを示した。

(1) シリコンチップ内のポテンシャルプロファイルの設計

スムーズに変化する非常に低い濃度分布を持つ n 型と p 型の 2 重エピタキシャル層を持つ特殊ウェーファを開発し、コレクションゲートの設計に曲線設計を適用した。この 2 つの技術を組み合わせることで、移動速度の合計が 10ns 以下に低減することを示した。すなわち電子の移動時間という観点からは、1 億コマ/秒が可能となる。

(2) 金属バスラインの設計

近畿大学で開発された稲妻バスライン技術と裏面照射の特徴を活かして、超高速化のために表面側の金属配線を再設計することにより、ダイナミックレンジを減らすことなく 20 Mfps を達成することができることを示した。

(2) ISIS-V12 の実験的評価

この素子の最高速撮影速度は 100 万コマ/秒 (1 Mfps) であった。感度は非常に高く、表面照射である ISIS-V2 のその約 10 倍であった。また信号取扱い容量 Q_{max} は $10,000e^-$ でトータルノイズレベルは $9e^-$ である。このビデオカメラはフルダイナミックレンジ 10 bits では 250 kfps で撮影できる。

またこの素子には Charge Carrier Multiplication (CCM) が裏面照射と冷却とともに導入されており、これにより、 $5e^-$ 以下という非常に低い画像信号検出レベルを達成した。

このノイズレベルは撮影速度に無関係に一定である。これは ISIS 構造の大きな特徴であり、超高速撮影時でも低いノイズレベルを保つことができる。

(3) ISIS-V16 の実験的評価

ISIS-V16 の設計は高速化のための金属配線を除いて ISIS-V12 のそれと完全に同一である。

最高撮影速度は 16 Mfps である。取扱い信号容量 (最大信号サイズ Q_{max}) は $15,000e^-$ である。ただし、フルダイナミックレンジで撮影できるのは 8 Mfps までであり、それ以上高速になると取扱い信号容量が下がり、最高撮影速度では $4,000e^-$ である。

(4) 適用例

本論文の最後の部分は、ISIS カメラの適用例である。この例は粘着テープを急激にはがすときのスティックスリップ構造への適用例である。

粘着テープを貼って剥がすことを繰り返すことで 1 シートのグラフェンを得たことは衝撃的な成果でありノーベル賞を受賞した。粘着テープを剥がす時に起こっている現象を超高速カメラで撮影した。その結果、粘着テープは連続的にほぼ一定のスピードではがれていくのではなく、ステップ的に急激にはがれることの繰り返しではがれていくこと、急激にはがす時には、それが多層的になっており、1 回のステップの中にさらに速いステップの繰り返しがあり、各ステップのはがれる瞬間には平均値よりはるかに強い力が働くことがわかった。このように開発したカメラはこれまで知られていない様々の高速度現象を明らかにするのに役立つことを示した。

以上の通り、本研究は工学上重要な課題を解決しており、博士 (工学) に値するものと認められる。