

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247029

研究課題名(和文) 超広視野撮像観測のための新しい低ノイズ大面積近赤外線検出器の開発

研究課題名(英文) New development of low-noise and large-format near-infrared image sensor for wide field astronomical observation

研究代表者

中屋 秀彦 (Nakaya, Hidehiko)

国立天文台・先端技術センター・助教

研究者番号：70450179

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,100,000円

研究成果の概要(和文)：可視光では検出できないより遠方の天体を探査するため、近赤外線による超広視野カメラの開発を目指して、工業用に普及し国産で入手可能なインジウムガリウムヒ素(InGaAs)イメージセンサーの低ノイズ化と小画素大面積化を行った。

工業用の市販素子を元に、低ノイズ素子を試作して読み出しノイズ $22e^-$ 、暗電流 $0.1e^-/\text{sec}/\text{pixel}$ 以下を達成した。つづいて、超広視野カメラに適した画素数と画素サイズ(1280×1280 , $15\mu\text{m}$ 画素)の試作を行った。小画素大面積化により読み出し性能が悪化したものの、不良画素の少ない素子を製造することができた。

研究成果の概要(英文)：To search higher redshift galaxies which can not be detected by an optical CCD sensor, we have improved the readout noise of a commercially available Indium Gallium Arsenide (InGaAs) small format near-infrared image sensor which is manufactured by a domestic company. Large format InGaAs sensors with a smaller pixel size have also been fabricated, which format is suitable with a near-infrared wide field camera.

The readout noise of the small format sensor achieved $22 e^-$, and the dark current fell under $0.1 e^-/\text{sec}/\text{pixel}$. Large format 1280×1280 arrays with $15\mu\text{m}$ pixel size was successfully fabricated with a small amount of bad pixels, however, the readout performance was slightly degraded.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：近赤外線検出器 超広視野カメラ

1. 研究開始当初の背景

可視光では大面積の高感度 CCD を多数並べたモザイクカメラによるサーベイ観測が世界の天文台で行われるようになり久しく、日本のすばる望遠鏡では CCD で検出可能な赤方偏移 7.3 までの遠方銀河の多くを発見しており、最近では、8m クラス望遠鏡では最大の焦点面積を持つ新しい可視光超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) が稼働を始めた。一方で、より遠方の銀河を検出可能な近赤外線による超広視野カメラは、衛星計画 (WFIRST 計画) があるものの、地上望遠鏡用としては計画されておらず、可視光のサーベイデータと相補的に用いることができる近赤外線データの取得は困難となっている。

天文観測用近赤外線イメージセンサーは、低ノイズ、高感度、大面積など、民生・工業用に比べて非常に高性能な仕様を要求されるが、現在使われている素子は米国 1-2 社による製品のみしかなく、高価かつ輸出規制により入手に時間と手間がかかるものとなっており、多数の調達に難しいことが、近赤外線超広視野カメラ開発をより難しくしている理由の一つとなっている。

2. 研究の目的

シリコン半導体を用いた CCD センサーは波長 1 μm までしか感度がなく、赤方偏移 7.3 を超える遠方銀河を探索するためには、化合物半導体を用いた近赤外線センサーが必要である。超広視野カメラでは多数の大面積センサーを並べて超広視野を実現するため、センサーの価格、入手性、メーカーサポートがカメラを開発するうえで重要な要素となる。そこで、国産で入手可能で工業用に既に普及し比較的安価と期待されるインジウム・ガリウム・ヒ素 (InGaAs) を使った近赤外線センサーを天文観測用として開発することにした。InGaAs センサーは冷却時に波長 0.9 μm から 1.6 μm に感度があり、素子温度 -130 前後で使用可能である。CCD の感度が落ちる波長 0.9 μm から 1.3 μm までの近赤外線カメラを、CCD カメラとほぼ同じ冷却設備と光学系を用いて実現することができ、赤方偏移 10 までの天体を検出することが可能になる。しかしながら、InGaAs センサーは天文観測用に試作された報告が数例あるものの、これまで天文観測にはほとんど用いられていない。市販されている工業用センサーは、天文観測に用いるにはノイズなどの読み出し性能や画素サイズ及び面積が不十分であり、これらを改善する必要がある。

3. 研究の方法

InGaAs を用いた国産の天文観測用近赤外線イメージセンサーを開発するため、浜松ホトニクス社の協力を得て、(1)国産で唯一入手可能な市販品について、メーカーでは行わない低温での読み出し性能評価 (2)低ノイズ化

の検証のため、市販品の CMOS 回路部を低ノイズ化した素子の試作 (3) 小画素化と大面積化の試作を行い、これらの低温での性能評価試験を行うとともに、広島大学かなた望遠鏡に取り付けて試験観測を行った。また、この素子を用いたモザイクカメラを想定した読み出しエレクトロニクスを試作した。

4. 研究成果

最初に、国産で市販されている 128 \times 128 (20 μm 画素) の工業用素子 (図 1) について、ノイズを抑えるため、メーカーでは行わない温度である 80K まで冷却して読み出し性能を調べた。

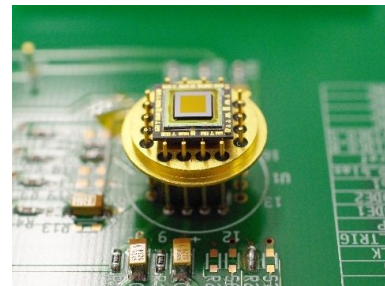


図 1 市販の 128 \times 128 (20 μm 画素) 素子

その結果、十分低温に冷却しても読み出しノイズが約 200 e⁻、暗電流が 20 e⁻/sec/pix 程度までしか下がらず、天文観測に用いるには不十分な性能であることがわかった。しかしながら、線形性、波長感度特性、画素内感度分布については大きな問題がないことを確認した。

そこで、この市販素子の CMOS 回路部を低ノイズに主眼をおいた回路構成で試作し、市販素子と同じ InGaAs フォトダイオードアレイを貼り合わせた素子を試作した (図 2)。

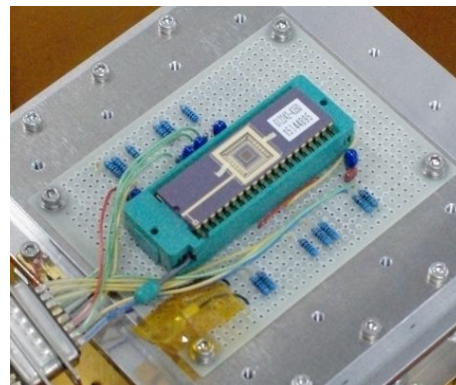


図 2 CMOS 回路部を低ノイズ化した 128 \times 128 (20 μm 画素) 素子

同様に冷却して測定をした結果、読み出しノイズ 22 e⁻ (図 3)、多重サンプリングによる読み出しノイズ 7 e⁻、暗電流は素子温度 120K で 0.1 e⁻/sec/pixel 以下 (図 4) となり、既存の天文観測用近赤外線センサーに匹敵する読み出し性能を達成した。暗電流は要求仕様を満たしたが、読み出しノイズについては要求仕様に僅かに及ばないものの、設計時

の予想に近い結果を得ることができた。また、同時に組み込んだ、15 μm 画素を実現することはできないがさらに低ノイズが期待できる画素回路では、読み出しノイズ 17 e^- となり、回路構成により改善の余地があることもわかった。暗電流については、CMOS回路からの発光があることが分かったが、発光を抑える読み出し方法により、要求仕様を満たす結果を得ることができた。これにより、InGaAsフォトダイオード部については暗電流が十分小さいことが確認された。この発光問題については、HSCで使用している赤側に高感度な大面積 CCD を用いた直接撮像により発光箇所を特定し、大面積素子の CMOS 回路設計に反映させた。

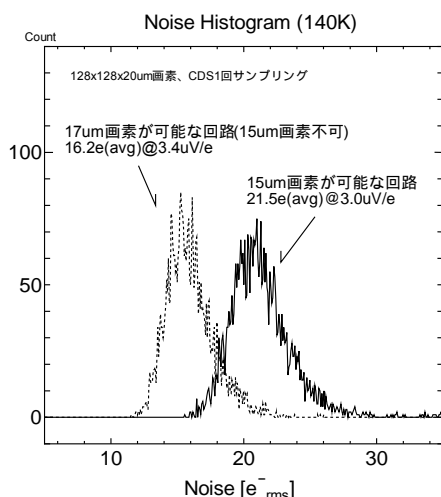


図3 低ノイズ 128×128 (20 μm 画素)素子のノイズヒストグラム

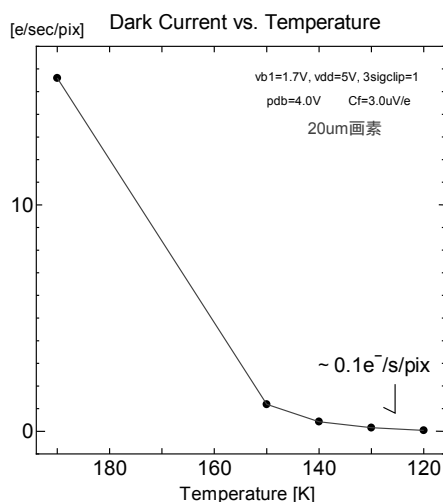


図4 低ノイズ 128×128 (20 μm 画素)素子の暗電流

次に、15 μm 画素の大面積素子の製造可否を調べるため、128×128 (20 μm 画素)素子の回路を用いて、すばる望遠鏡で使用されている CCD と同じ 15 μm 画素の 1280×1280素子を試作した(図5)。サイズは CMOS 回路製造で用いるレチクルのサイズから可能な最大サイズとなった。工業用 InGaAs センサーでは 1920×1080 の海外製品があるが、

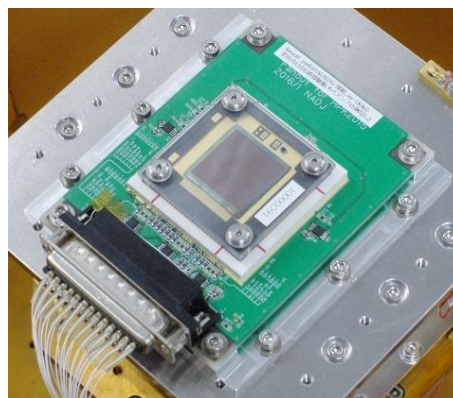


図5 小画素・大面積化した 1280×1280 (15 μm 画素) InGaAs 素子



図6 1280×1280 (15 μm 画素) InGaAs 素子の画像例
不良画素は非常に少ない

それに次ぐサイズとなる。

冷却試験の結果、不良画素が非常に少ない素子を製造することができ、小画素大面積素子の製造が可能であることがわかった(図6)。また、小面積素子で問題となった CMOS 回路の発光は問題にならない程度に抑えられ、暗電流も低いことを確認した。しかしながら、読み出しノイズが2倍近くに悪化していること、再現性のない固定パターンが現れることがわかっており、小画素大面積化と低ノイズ化の両立という点では不十分な結果となった。より微細な CMOS 製造プロセスと低ノイズ画素回路の採用で要求仕様を達成できるか検討を進めている。

1280×1280 (15 μm 画素)素子を広島大学の 1.6m かなた望遠鏡に取り付けて試験観測を行った(図7)。試験用クライオスタットに天文観測用の Y バンド、J バンド、H バンドのフィルターを取り付けて観測を行った。不安定な天候により定量的な解析結果を得ることはできなかったが、近赤外線による天体画像を取得することに成功した(図7右下)。

また、複数の 1280×1280 (15 μm 画素)素子を並べるモザイクカメラを想定した読み出しエレクトロニクスを試作した(図8)。デジタルバックエンドは、今回は HSC の回路基板を用いることにし、既設 FPGA (Field Programmable Gate Array) を書き換えることで実現した。アナログフロントエンドは、

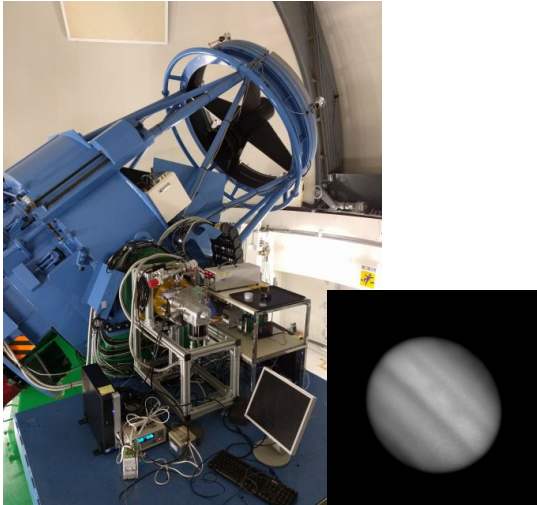


図7 広島大学かなた望遠鏡に搭載した
1280×1280 素子を使ったカメラと
取得画像例(右下:木星、Hバンド)

小型 FPGA を搭載した回路基板を新規に制作した。可視光 CCD センサーを並べる場合と比較してデータ量が膨大になるため、データラインの高速化、信号線数の削減、オーバーサンプリングによる低ノイズ化に必要な高速高精度 ADC やオンボードオーバーサンプリング加算機能の搭載などを行い、近赤外線超広視野カメラに搭載する多数の素子を同時かつ低ノイズに読み出すために必要な回路構成や機能の検証を行った。



図8 1280×1280 素子のモザイクカメラ
駆動を想定した試作エレクトロニクス
(左)バックエンド(右)フロントエンド

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) Nakaya, Hidehiko; Komiyama, Yutaka; Kashikawa, Nobunari; Uchida, Tomohisa; Nagayama, Takahiro; Yoshida, Michitoshi, 2016, Low temperature performance of a commercially available InGaAs image sensor, Proceedings of the SPIE, Volume 9915, 991510, DOI 10.1117/12.2231169, 査読無

- (2) Komiyama, Y.; Nakaya, H.; Kashikawa, N.; Uchida, T., 2016, Conceptual design of wide-field focal plane with InGaAs image sensors, Proceedings of the SPIE, Volume 9908, 99085X, DOI 10.1117/12.2231569, 査読無

〔学会発表〕(計7件)

- (1) 森裕樹、広島大学かなた望遠鏡周辺の装置開発の現況、可視赤外線観測装置技術ワークショップ、2016年11月24日~25日、国立天文台(東京都三鷹市)
- (2) 中屋秀彦、国産で目指す、超広視野天文観測用近赤外線イメージセンサー、日本赤外線学会研究発表会、2016年11月17日、国立天文台(東京都三鷹市)
- (3) 中屋秀彦、国産の天文観測用低ノイズ InGaAs 近赤外線イメージセンサーの試作、日本天文学会秋季年会、2016年9月14日、愛媛大学(愛媛県松山市)
- (4) 中屋秀彦、光赤外線で宇宙を探る~天文観測用撮像素子と大型望遠鏡、半導体デバイスの放射線照射効果研究会、2016年3月16日、日本大学(東京都千代田区)
- (5) 中屋秀彦、天文観測用低ノイズ大面積 InGaAs 近赤外線センサー、NIBB パイオイメージングフォーラム、2016年2月17日、基礎生物学研究所(愛知県岡崎市)
- (6) 中屋秀彦、国産の市販 InGaAs 近赤外線イメージセンサー冷却評価試験、日本天文学会秋季年会、2015年9月11日、甲南大学(兵庫県神戸市)
- (7) 中屋秀彦、天文観測用画像センサー読み出し IC の試作、日本天文学会秋季年会、2014年9月11日、山形大学(山形県山形市)

〔その他〕

- (1) 国立天文台三鷹キャンパス特別公開における展示、2016年10月22日、2015年10月24日、2014年10月25日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中屋 秀彦 (NAKAYA, HIDEHIKO)
国立天文台・先端技術センター・助教
研究者番号: 70450179

(2) 研究分担者

柏川 伸成 (KASHIKAWA, NOBUNARI)
国立天文台・TMT 推進室・准教授
研究者番号: 00290883

小宮山 裕 (KOMIYAMA, YUTAKA)
国立天文台・ハワイ観測所・助教
研究者番号: 20370108

内田 智久 (UCHIDA, TOMOHISA)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速
器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号：40435615

(3) 連携研究者

吉田 道利 (YOSHIDA, MICHITOSHI)
広島大学・宇宙科学センター・教授
研究者番号：90270446

田中 真伸 (TANAKA, MANOBU)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速
器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号：00222117
(平成 26 年度のみ連携研究者)

(4) 研究協力者

川端 弘治 (KAWABATA, KOJI)
広島大学・宇宙科学センター・准教授
研究者番号：60372702

永山 貴宏 (NAGAYAMA, TAKAHIRO)
鹿児島大学・理工学域理学系・准教授
研究者番号：00533275