

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01117

研究課題名(和文) 超広視野撮像観測に用いるCCDと同じ空間分解能の低ノイズ近赤外線検出器の開発

研究課題名(英文) Development of a low noise near infrared image sensor with 15um pixels 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) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)： 初期宇宙の星や銀河を調べるため、近赤外線による広視野モザイクカメラに必要なインジウム・ガリウム・ヒ素(InGaAs)化合物半導体を用いた、国産による低ノイズ大面積近赤外線イメージセンサーを開発した。

可視光CCDセンサーと同じ画素サイズ15umを持つこれまでの試作素子では、読み出しノイズは要求仕様を上回っていたが、本研究により目標としていた5e-を達成した。大面積素子で問題となっていた残像をなくすことができ、暗電流は0.1e-/s/pix以下を達成した。新たに開発した3辺バタブルパッケージにも搭載し、将来的に広視野モザイクカメラを実現できる近赤外線イメージセンサーの開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

初期宇宙の星や銀河の観測は、これまでシリコン半導体を用いた可視光広視野カメラによって広域探査されてきた。より古い遠方の天体を探査するためには、化合物半導体を用いた近赤外線センサーを用いる必要があるが、米国一社によるものしかなく高価で入手が難しいことなどから、8mクラス望遠鏡には近赤外線広視野カメラは存在しない。

本研究により開発した近赤外線イメージセンサーは、上記の科学目的を達成する近赤外線広視野モザイクカメラに必要な仕様を満たしながら、より安価な材料を用いて国産により調達が可能である。このセンサーを用いることにより、将来的に、現実的な予算で近赤外線広視野カメラを実現することが可能となった。

研究成果の概要(英文)： We have successfully developed a large format and low noise near infrared image sensor manufactured by a domestic company, which is required to build a near infrared wide field mosaic camera to study first stars and galaxies.

Although the readout noise of the sensor developed before with the same pixel size (15um) as the one of optical CCD sensors was higher than our requirement, we achieved the readout noise of 5e- this time, which was the goal of our development. Since we removed the image latency problem, the dark current less than 0.1e-/s/pix was achieved with also the large format sensor. The sensor assembled on a newly developed 3-side buttable package enables us to build the near infrared wide field mosaic camera in future.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：近赤外線検出器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

遠方の天体は赤方偏移により波長が長くなり赤くなる。宇宙誕生初期の星形成や銀河形成を調べるためには、こうした赤方偏移の大きい天体を多く見つけて調べる必要がある。現在稼働中の広視野モザイクカメラは、多くがシリコン半導体センサーを使った可視光カメラであり、特に8mを超える望遠鏡用としては、日本のすばる望遠鏡による Hyper Suprime-Cam が稼働中であるほか、米国の LSST 計画が進行中である。しかしながら、これらシリコン半導体センサーを用いた可視光装置では、赤方偏移 7.5 までが観測できる限界であり、著しくシリコンセンサーの感度が低い波長域を使っているのが実情である。より遠方の赤方偏移の大きい天体を調べるには、化合物半導体を用いた近赤外線センサーを用いる必要があるが、近赤外線センサーを搭載した同様な広視野モザイクカメラは、世界の 8m クラス望遠鏡には存在しない。天文観測で用いられている近赤外線センサーは米国 1 社により供給されているのみで、非常に高価であるほか、軍事転用可能な技術として米国からの輸出には煩雑な手続きが必要であり、入手には手間と時間がかかることが理由の一つである。また、広視野モザイクカメラは、多数の画像センサーをモザイク状に並べることにより超広視野を実現するため、コストだけではなくサポートも重要である。広視野モザイクカメラの中核となる画像センサーは、大量調達が容易で十分なサポートが得られる国産であることも重要な要素である。

2. 研究の目的

国産が可能で低コストが期待されるインジウム・ガリウム・ヒ素(InGaAs)化合物半導体と、天文観測に最適化した CMOS 回路を組み合わせた近赤外線センサーの開発を始めたが、天文観測に用いるためにはいくつかの解決すべき問題が残っていた(研究課題 26247029)。本研究では、これらの問題を解決し、広視野モザイクカメラに用いることができる近赤外線イメージセンサーを完成させることが目標である。解決すべき問題は大きく以下の 3 点であった。(1) 読み出しノイズをさらに小さくする、(2) 残像を小さくする、(3) モザイクカメラに使用可能な 3 辺ダブルパッケージへ搭載することである。

3. 研究の方法

(1) これまでより微細な CMOS 製造プロセスを採用し、より低ノイズが期待される画素回路を採用する。最初に小面積素子を製造し、新たに採用する CMOS 製造プロセスにより低ノイズが実現できるか検証する。同時に、大面積素子が小面積素子よりも読み出しノイズが大きくなってしまふ原因を、既存素子を使って調査する。

(2) 既存素子を用いて、残像の原因が CMOS 回路部にあるのかセンサー部にあるのか、それとも組み立てなどに起因するのかを調査する。その後、製造工程に変更を加えたサンプルを試作し残像を調べる。

(3) モザイクカメラに使用可能な 3 辺ダブルパッケージを開発し、新しい素子を 3 辺ダブル素子に組み立てて、検出器の性能を評価する。

4. 研究成果

(1) これまでよりも微細な CMOS 製造プロセスによる小面積素子(128×128)を試作した。前回試作した小面積素子は市販素子と同じ画素サイズ 20 μm であった。今回は、大面積素子の読み出しノイズをできるだけ模擬するよう、画素サイズを大面積素子と同じ 15 μm で試作した(図 1)。この素子を冷却して読み出し試験を行った結果、設計段階で期待した読み出しノイズを得ることができた。これまでと異なる CMOS 製造プロセスであったが、我々が求める読み出し性能を実現できることが明らかになったほか、より微細な CMOS 製造プロセスを採用したことにより、さらなる読み出しノイズの向上を期待通り実現することができた。さらに、前回の CMOS 製造プロセスでは、必要とする画素サイズを実現できないため、大面積素子に採用できなかった画素回路を採用できることと合わせ、前回の小面積素子の読み出しノイズ 22e⁻から目標とする 10e⁻程度が得られることがわかった。

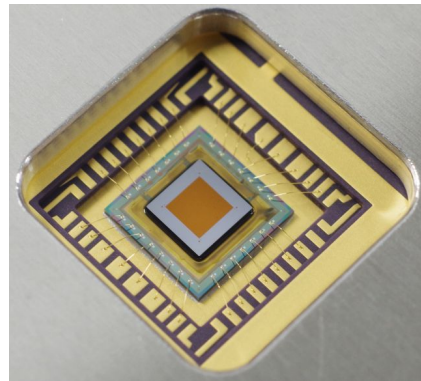


図 1 より微細な CMOS 製造プロセスを用いて試作した小面積素子(128×128)

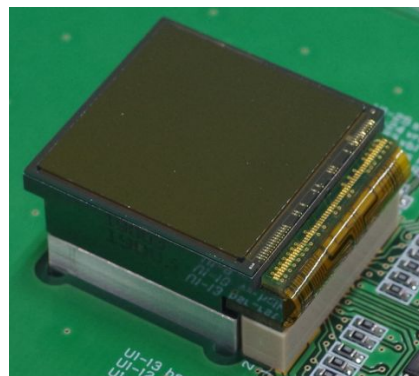


図 2 3 辺ダブルパッケージに搭載した大面積素子(1280×1280)

(2) これまでに製造した素子を使い、様々な試験を行った結果、残像は CMOS 回路と関係ないことがわかった。残像はセンサー内で生じているが、原因はセンサー部と CMOS 回路部の熱収縮の違いによることが起因であると予想された。関連すると思われる製造工程を見直し、いくつかのサンプルを試作して、残像が生じない製造法を採用することにした。

(3) 3 辺バタブルパッケージは、シリコンと熱膨張率が近く機械加工性が良いセラミック材料である炭化ケイ素(SiC)を用いた。これは海外の天文用イメージセンサーでも用いられている。このパッケージは 0.2mm の隙間で並べると、有効なイメージエリアの割合は 0.64 となる。予備試験として、この 3 辺バタブルパッケージに前回の大面積素子を搭載して、パッケージにより読み出し性能に違いが生じるかを検証した。その結果、期待した低ノイズ性能を得られることがわかった。前回、大面積素子が小面積素子よりも読み出しノイズが悪化した原因が、旧パッケージ内の結線にあることがはっきりした。他の問題も発見されず、この 3 辺バタブルパッケージを新しい素子に採用することとした。

以上の予備試験と準備の後、(1)の微細 CMOS 製造プロセスによる大面積素子を製造した。この大面積素子は(2)で試した製造方法を採用してセンサー部と CMOS 回路部を組み立てた。最後に(3)で製造した 3 辺バタブルパッケージに搭載した(図 2)。この素子を冷却して試験した結果、低速読み出しと参照画素による画像処理後の読み出しノイズはダブルサンプリングで約 $10e^-$ 、マルチサンプリング(Fowler Sampling)では約 $4e^-$ を達成した(図 3)。これは、米国製センサーと同等か、条件によっては良い結果である。暗電流は、残像がなくなったため、これまでに小面積素子で確認できていた $0.1e^-/s/pix$ 以下(検出器温度 130K)を大面積素子でも達成することができた(図 4)。

その他、前回製造した素子を鹿児島大学 1m 望遠鏡に搭載して試験観測を行い、実際に天体を導入した検出器試験を行った(図 5)。

開発した近赤外線センサーの仕様一覧

画素数	1280 × 1280
画素サイズ	15 μ m × 15 μ m
イメージエリア	19.2mm × 19.2mm
出力ポート	2 ポートまたは 8 ポート
読み出し時間	4.2 秒または 1.0 秒
	(200k pix/s/port の時)

読み出しノイズ

ダブルサンプリング	約 $10e^-$
マルチサンプリング	約 $4e^-$
暗電流	$0.1 e^-/s/pix$ 以下(130K)
3 辺バタブル	
並べた時のフィルファクター	0.64

< 引用文献 >

Majid Zandian, et al., "Performance of science grade HgCdTe H4RG-15 image sensors", Proceedings of the SPIE, Volume 9915, id. 99150F 11 pp. (2016)

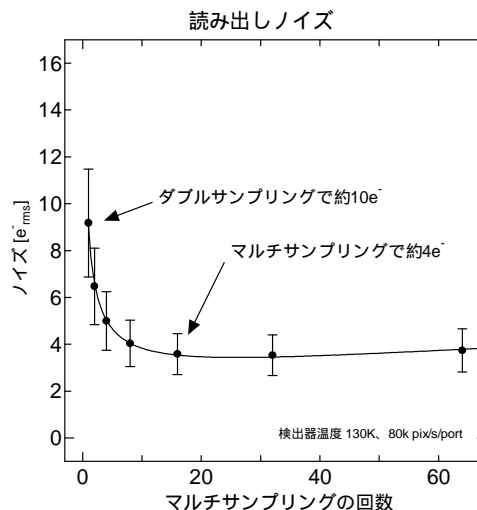


図 3 読み出しノイズ

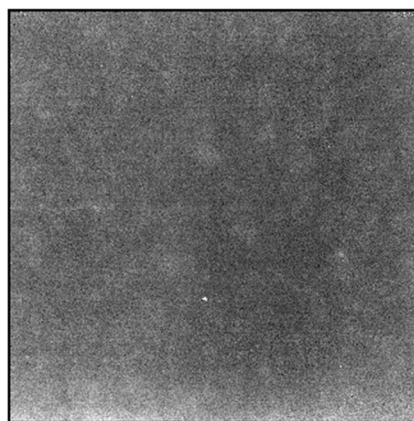


図 4 暗電流画像 (5 分、130K)
(10 枚の median 画像、
エンジニアリンググレード)



図 5 鹿児島大学 1m 望遠鏡によるオリオン大星雲 (前回製造素子を使用)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中屋秀彦、小宮山裕、吉田道利、川野元聡、藤井泰範、柏川伸成、川端弘治、永山貴宏、長田哲也
2. 発表標題 低ノイズ・大面積・バツダブル・国産InGaAs近赤外線イメージセンサーの開発
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中屋秀彦、小宮山裕、吉田道利、柏川伸成、内田智久、川端弘治、永山貴宏
2. 発表標題 InGaAs近赤外線イメージセンサーの低ノイズ化と検証用エレクトロニクス
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永山貴宏、出崎一成、須藤順平、川本莉奈、中屋秀彦、川端弘治
2. 発表標題 国産1.3k x 1.3k InGaAs赤外線検出器の鹿児島大学1m望遠鏡での試験観測
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中屋秀彦、小宮山裕、柏川伸成、吉田道利、内田智久、永山貴宏、森裕樹、松場祐樹、川端弘治
2. 発表標題 国産の天文観測用大面積InGaAs近赤外線イメージセンサーの試作
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森裕樹、川端弘治、松場祐樹、中屋秀彦、吉田道利、伊藤亮介、内田智久、永山貴宏
2. 発表標題 1.3k × 1.3k InGaAs赤外線検出器の広島大学観測環境下における性能評価
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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、2019年10月26日、2018年10月27日、2017年10月14日

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	永山 貴宏 (NAGAYAMA TAKAHIRO) (00533275)	鹿児島大学・理工学域理学系・准教授 (17701)	望遠鏡を用いた検出器試験
研究協力者	柏川 伸成 (KASHIKAWA NOBUNARI)		
研究協力者	小宮山 裕 (KOMIYAMA YUTAKA)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	川野元 聡 (KAWANOMOTO SATISHI)		
研究協力者	藤井 泰範 (FUJII YASUNORI)		
研究協力者	川端 弘治 (KAWABATA KOJI)		
研究協力者	長田 哲也 (NAGATA TETSUYA)		