

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23244030

研究課題名(和文)安価な高感度・大フォーマット近赤外線検出器の基礎開発

研究課題名(英文)Basic development of high sensitivity, large format and inexpensive near-infrared image sensor

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,000,000円、(間接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：高感度・大フォーマットの近赤外線検出器の基礎開発として、浜松ホトニクス社と協力して、同社の64×64画素、および、128×128画素のInGaAs近赤外線検出器の冷却環境下での性能試験を行い、検出器特性を明らかにした。試験に当たっては、近赤外線検出器試験のための専用の真空冷却デューワーおよび、検出器の読み出し回路を製作した。64×64画素検出器の試験結果をもとに改良した128×128画素InGaAs検出器では、110Kの冷却下で量子効率80%、有感波長0.9μm～1.6μm、読み出し雑音160電子などの性能を達成した。これらの基礎特性をメーカーにフィードバックし今後のセンサ開発の方向性を定めた。

研究成果の概要(英文)：We made performance evaluations of InGaAs near-infrared image sensor which are produced by Hamamatsu Photonics Co. Ltd. (HPK) under cold environment in collaboration with HPK. We tested a 64 x 64 pixels with 50 micron pitch array and 128 x 128 pixels with 20 micron pitch array sensors. Before testing the sensors, we developed a vacuum-cooling dewar which is dedicated to performance evaluation of optical-infrared image sensors and a sensor readout system. The evaluation system we developed is very versatile to be used for testing various types of optical-infrared image sensors. We found that 128 x 128 pixel sensor has a quantum efficiency of 80% in a wavelength region from 0.9 microns to 1.6 microns with a readout noise of 160 electrons. We fed back the results of our performance evaluation tests to the manufacturers, and define a direction to next development of new infrared image sensors.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学，天文学

キーワード：天文学 光学赤外線天文学 赤外線検出器

1. 研究開始当初の背景

高感度大フォーマット赤外線イメージセンサは、重要な軍需物質としてアメリカで開発され、一部分、そのおこぼれが民生用として出回っているが、非常に高価である上、貿易上の制限が厳しく手に入りにくい点が長らく難点で、いまだ解決されていない。高感度大フォーマット赤外線イメージセンサは、天文学はもとより、物性、生物、医学などさまざまな分野で需要が高いが、上記の理由により需要に供給が追い付いていない状態である。また、そうした赤外線イメージセンサの主流品は、水銀、カドミウム、テルルの3元化合物 (HgCdTe) であり、環境汚染物質である。このため、製造段階で致命的な環境問題が出るおそれがあり、環境汚染の少ない代替物による、本格的な高感度2次元センサの実現が求められていた。

2. 研究の目的

今回のプロジェクトでは InGaAs を用いた高感度赤外線イメージセンサの開発を試みる。ガリウムヒ素 (GaAs) は半導体回路材料としてポピュラーで、インジウム (In) もよく使われる材料であり、双方ともに取り扱いの手法は確立して安全にプロセスを進められる点が、環境への配慮からも好都合である。感度のある波長領域は、元素の割合を変える事で調節可能であるが、本プロジェクトでは、現時点で最も経験を蓄積している常温時の有感波長域 $1 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 、冷却時の有感波長域 $1 \sim 1.6 \mu\text{m}$ のイメージセンサ ($1.7 \mu\text{m}$ カットオフタイプ) の開発を目指す。

InGaAs 半導体を用いた $1.7 \mu\text{m}$ カットオフタイプの国産赤外線イメージセンサは、浜松ホトニクス (株) により、 20×256 画素のものが製品化されている。しかし、それは常温仕様で、熱雑音の主たる雑音源となっており、そのままでは微弱赤外線を検出することは不可能である。そこで、我々は本研究において、InGaAs 赤外線イメージセンサの冷却性能試験を徹底して行い、結果を素早くメーカーにフィードバックすることによって、微弱赤外線検出分野において必要な高感度化、低雑音化を推進する。それと並行して、センサの大フォーマット化を推進する。本研究を開始する前に、我々の研究グループでは、浜松ホトニクス (株) との共同開発研究として、 $1.7 \mu\text{m}$ カットオフタイプの InGaAs 赤外線イメージセンサの開発に着手しており、 64×64 画素のセンサの試作品の冷却時の性能テストを開始している。本研究は、この共同開発研究の強力な推進を目指すものである。

3. 研究の方法

本研究は、半導体センサ専門メーカー (浜松ホトニクス (株)) と共同して行う。半導体プロセスに関連する部分は、専用の工場以外では不可能であるから、浜松ホトニクスに

委託開発する。我々のグループでは、赤外線センサの熱雑音を抑えて詳細な性能評価を行うために、温度を制御しながら冷却できる試験システムを製作し、試作センサの冷却性能試験を行う。試験システムの真空冷却デューワーは、将来の大フォーマットセンサ ($2\text{K} \times 2\text{K}$ 画素、チップサイズ $50\text{mm} \times 50\text{mm}$) を取り付け治具とともに設置して試験できることを考慮して、真空槽の容量に余裕を持たせたものを製作する。冷凍機は最終的にセンサの駆動温度である 70K まで安定的に冷凍できる性能のものを選定する。センサの読み出しのためには、国立天文台で開発され、利用実績のある検出器コントローラ MessiaV を用いた読み出しシステムを整える。MessiaV は、現在広島大学に観測装置開発用の予備品が一式存在するので、それを用いてシステムを構築する。読み出しに関わるアナログ回路部分は新たに製作する。

試験システム構築後、まず、 64×64 画素の InGaAs センサの冷却試験を行う。冷却試験にて問題点を見つけた場合には我々のグループと浜松ホトニクスの両方で協議しながら解決の方法を見つける。 64×64 画素センサの冷却試験で性能評価が確立したら、 128×128 画素センサの試験に移行し、適宜浜松ホトニクスと協議をしながら開発を進める。

4. 研究成果

(1) 赤外線センサ冷却試験システムの構築。

将来の $2\text{K} \times 2\text{K}$ 画素程度の大フォーマット赤外線センサの性能試験を行う事のできる、センサ試験用の真空冷却デューワーを開発した (図1)。開発したデューワーは、GM型冷凍機を備え、真空到達度 10^{-7} Torr、最低到達温度 30K (検出器ステージ) で、内部ヒーターを用いて検出器温度を $30\text{K} \sim 200\text{K}$ まで温度制御可能である。また、内部にコールドシャッター、フィルター交換機構を持つ。

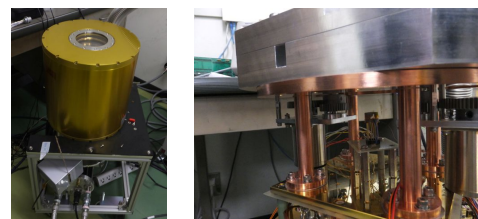


図1. 製作した試験用真空冷却デューワー。概観 (左図) と内部構造 (右図)。フィルター交換機構と検出器ステージが見える。

センサ読み出しシステムとして、国立天文台で開発された MessiaV システムをバックエンドとして導入し、フロントエンドのアナログ回路部分は自主開発した。

こうして構築したセンサ冷却試験システムは、赤外線センサのみならず可視光センサの試験にも使用できる汎用のもので、フロントエンド部を交換するだけで様々なセンサに対応できる。

(2) 64×64 画素 InGaAs 赤外線センサの冷却性能試験。

(1) で構築したシステムを用いて、浜松ホトニクス社から提供を受けた 64×64 画素の InGaAs 赤外線センサ(図2)の冷却性能試験を行った。このセンサは常温使用を想定して

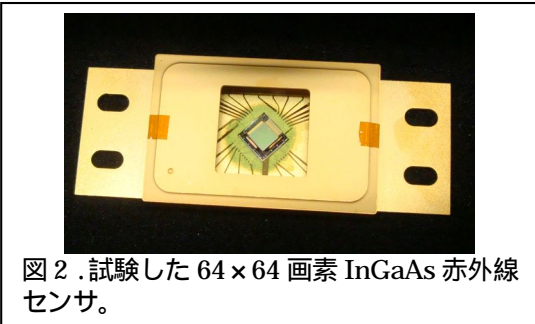


図2 .試験した 64×64 画素 InGaAs 赤外線センサ。

開発されたもので、冷却化での性能確認は行われていなかった。浜松ホトニクスでの常温試験と比較するため、常温(298K)と冷却下(90K)の両方で試験を行った。性能評価項目は、読み出し雑音、暗電流、応答線形性、波長感度特性、量子効率である。読み出し雑音は常温下で約 2000 電子と高く、90K では 1200 電子と約半分に落ちることが確認できたが、天体観測に应用するには2桁近く高いことが分かった。量子効率は約 70%と良好で、応答線形性も 15000 カウントまで良好(直線からのズレが±1%)であることが分かった(図3)。暗電流は 90K で常温時の約 100 分の 1 にまで低下することが分かった。

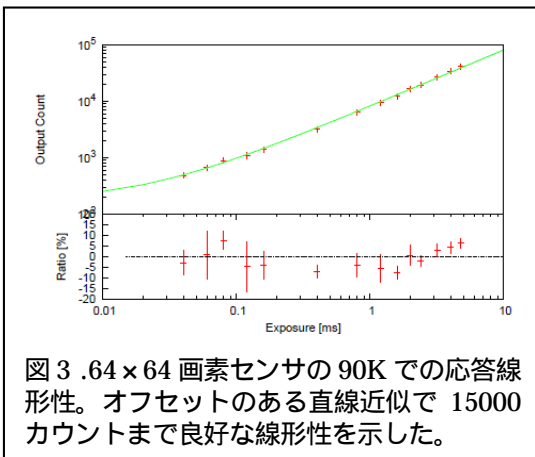


図3 .64×64 画素センサの 90K での応答線形性。オフセットのある直線近似で 15000 カウントまで良好な線形性を示した。

(3) 128×128 画素 InGaAs 赤外線センサの冷却性能試験。

64×64 画素 InGaAs センサの冷却性能試験結果を受けて、我々のグループと浜松ホトニクス社で協議した結果、読み出し雑音の低減が第一の開発目標であるとの結論に達した。そこで、センサの読み出し回路をチャージアップ方式からソースフォロア方式に変更して、雑音低減を目指した 128×128 画素の InGaAs 赤外線センサを新たに試験した。

64×64 画素センサと同様の試験を行い、読み出し雑音はマルチサンプリングモードで

は約 160 電子と大きく改善していることが分かった。ただし、まだ HgCdTe を用いた最先端の赤外線センサと比較すると1桁ほど雑音レベルが高い。量子効率や応答線形性は 64×64 画素センサと同等であった。暗電流については 110K において、常温時の 10⁴分の 1 に低下しており、64×64 画素センサと比較して大きく改善していることが分かった(図4)。

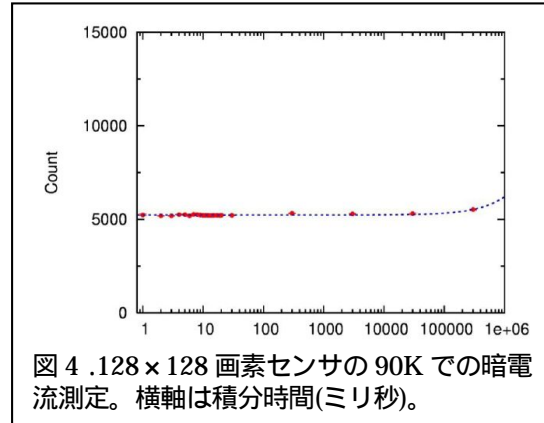


図4 .128×128 画素センサの 90K での暗電流測定。横軸は積分時間(ミリ秒)。

また、InGaAs 素子を使用している市販の赤外線カメラを購入して比較実験を行った。その結果、冷却時の暗電流については浜松ホトニクス社の 128×128 画素センサの性能の方が良いことが分かった。

一連の試験を通じて、まずセンサ CMOS 部分の雑音低減が最も重要な課題であることをメーカーとの共通理解として得た。これを基に、浜松ホトニクスで新たなセンサ開発を行う方向性を定めることができた。

(4) 640×512 画素 InGaAs 赤外線センサを搭載した赤外線カメラシステムの構築。

浜松ホトニクス社では、128×128 画素 InGaAs 赤外線センサのフォーマットを拡大して、640×512 画素センサを開発中である。このセンサを用いて天文観測を行うための赤外線カメラシステムを、(1) で制作したセンサ試験システムを用いて構築した。

(5) 赤外線観測による天文学的成果。

上記の赤外センサ試験と並行して、赤外線による天体観測を実施して、超新星、活動銀河中心核などの観測で科学的成果を挙げた。

(まとめ)

国産の 128×128 画素 InGaAs 赤外線センサの冷却性能試験を行い、その性能評価を行った。結果はメーカー(浜松ホトニクス社)にフィードバックし、問題点の洗い出しを行い、今後の開発方針を定めることができた。研究開始当初に目指した大フォーマットセンサの開発にまでは至らなかったが、これはメーカーとの共同研究で、ステップ・バイ・ステップで着実に開発を進めてきた結果である。本研究を通じて、メーカーとともに新たな開発の方向性を見出した。本研究で構築した試験システムは様々なセンサ試験に使用でき

る汎用性の高いものであり、また、そのまま望遠鏡に装着してカメラとして使用できる機能を持っており、今後のセンサ開発や天体観測研究のための資産を残すことができた。

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 19 件)

1. Yamanaka, M., Kawabata, K.-S., et al., "Early-phase Photometry and Spectroscopy of Transitional Type Ia SN 2012ht: Direct Constraint on the Rise Time", The Astrophysical Journal, 782, L35, (2014) 査読有 DOI: 10.1088/2041-8205/782/2/L35
2. Maeda, K., Kawabata, K.-S., et al., "Properties of Newly Formed Dust Grains in the Luminous Type II_n Supernova 2010jl", The Astrophysical Journal, 776, 5, (2013) 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/776/1/5
3. Itoh, R., Kawabata, K.-S., Uemura, M., Yoshida, M., et al., "Minute-scale Rapid Variability of the Optical Polarization in the Narrow-line Seyfert 1 Galaxy PMN J0948+0022", The Astrophysical Journal, 775, L26, (2013) 査読有 DOI: 10.1088/2041-8205/775/1/L26
4. Takaki, K., Kawabata, K.-S., Uemura, M., Yoshida, M., et al., "A Luminous and Fast-expanding Type Ib Supernova SN 2012au", The Astrophysical Journal, 772, L17, (2013) 査読有 DOI: 10.1088/2041-8205/772/2/L17
5. Fukui, A., Yoshida, M., et al., "Optical-to-near-infrared Simultaneous Observations for the Hot Uranus GJ3470b: A Hint of a Cloud-free Atmosphere", The Astrophysical Journal, 770, 95, (2013) 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/770/2/95
6. Itoh, R., Kawabata, K.-S., Uemura, M., Yoshida, M., et al., "Dense Optical and Near-infrared Monitoring of CTA 102 during High State in 2012 with OISTER: Detection of Intra-night 'Orphan Polarized Flux Flare'", The Astrophysical Journal, 768, L24, (2013) 査読有 DOI: 10.1088/2041-8205/768/2/L24
7. Sakimoto, K., Uemura, M., Kawabata, K.-S., Yoshida, M., et al., "Photopolarimetric Monitoring of the Blazar BL Lac in the Optical and Near-Infrared Bands: Decay of the Long-Lived Component", Publications of the Astronomical Society of Japan, 65, 35, (2013) 査読有 DOI: 10.1093/pasj/65.2.35
8. Gandhi, P., Kawabata, K.-S., "SN 2009js at the Crossroads between Normal and Subluminous Type IIP Supernovae: Optical and Mid-infrared Evolution", The Astrophysical Journal, 767, 166, (2013) 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/767/2/166
9. Rani, B., Kawabata, K.-S., et al., "Radio to gamma-ray variability study of blazar S5 0716+714", Astronomy and Astrophysics, 552, A11, (2013) 査読有 DOI: 10.1051/0004-6361/201321058
10. Itoh, R., Uemura, M., Kawabata, K.-S., Yoshida, M., et al., "A Study of the Long-Term Spectral Variations of 3C 66A Observed with the Fermi and Kanata Telescopes", Publications of the Astronomical Society of Japan, 65, 18, (2013) 査読有 DOI: 10.1093/pasj/65.1.18
11. Hayashida, M., Kawabata, K.-S., et al., "The Structure and Emission Model of the Relativistic Jet in the Quasar 3C 279 Inferred from Radio to High-energy gamma-Ray Observations in 2008-2010", The Astrophysical Journal, 754, 114, (2012) 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/754/2/114
12. Bufano, F., Kawabata, K.-S., et al., "The Highly Energetic Expansion of SN 2010bh Associated with GRB 100316D", The Astrophysical Journal, 753, 67, (2012) 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/753/1/67
13. Sasada, M., Uemura, M., Kawabata, K.-S., Yoshida, M., et al., "Multi-Wavelength Photometric and Polarimetric Observations of the Outburst of 3C 454.3 in 2009 December", Publications of the Astronomical Society of Japan, 64, 58, (2012) 査読有 DOI: 10.1093/pasj/64.3.58
14. Ackermann, M., Kawabata, K.-S., Uemura, M., Yoshida, M., et al., "Multi-wavelength Observations of Blazar A0 0235+164 in the 2008-2009 Flaring State", The Astrophysical Journal, 751, 159, (2012) 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/751/2/159

10.1088/0004-637X/751/2/159

15. Yoshida, M., et al., “Kinematics and Excitation of the Ram Pressure Stripped Ionized Gas Filaments in the Coma Cluster of Galaxies”, The Astrophysical Journal, 749, 43, (2012) 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/749/1/43

16. Huang, K.-Y., Yoshida, M., et al., “GRB 071112C: A Case Study of Different Mechanisms in X-Ray and Optical Temporal Evolution, The Astrophysical Journal, 748, 44, (2012) 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/748/1/44

17. Kim, J., Yoshida, M., et al., “Multiband Optical Observation of the P/2010 A2 Dust Tail”, The Astrophysical Journal, 746, L11, (2012) 査読有 DOI: 10.1088/2041-8205/746/1/L11

18. Ikejiri, Y., Uemura, M., Kawabata, K.-S., Yoshida, M., et al., “Photopolarimetric Monitoring of Blazars in the Optical and Near-Infrared Bands with the Kanata Telescope. I. Correlations between Flux, Color, and Polarization”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 639, (2011) 査読有 DOI: 10.1093/pasj/63.3.327

19. Sasada, M., Uemura, M., Kawabata, K.-S., Yoshida, M., et al., “Prominent Polarized Flares of the Blazars A0 0235+164 and PKS 1510-089”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 489, (2011) 査読有 DOI: 10.1093/pasj/63.3.489

[学会発表](計 10 件)

1. Yoshida, M., “SGMAP project: Search for Galactic Magnetic field by All-sky Polarization survey”, Medium-Size Telescope Science Workshop, June 13 2013, Kuming, China

2. Sakimoto, K., Kawabata, K.-S., Yoshida, M., et al., “An optical and near-infrared multipurpose instrument HONIR”, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, July 1 2012, Amsterdam, Netherlands

3. Hirahara, Y., Kawabata, K.-S., Yoshida, M., et al., “First light observation of GIGMICS (germanium immersion grating mid-infrared cryogenic spectrograph) by

Kanata 1.5-m Telescope at Higashi-Hiroshima Observatory”, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, July 1 2012, Amsterdam, Netherlands

4. 伊藤亮介、吉田道利、川端弘治、他、「近赤外線検出器評価システムの立ち上げと InGaAs 検出器の評価」、可視赤外線観測装置技術ワークショップ、2012 年 2 月 22 日、国立天文台

5. Yoshida, M., “Kinematics and excitation of the ram pressure stripped ionized gas of galaxies in the Coma cluster”, Fornax, Virgo, Coma et al., Stellar Systems in High Density Environments”, June 27-July 1 2011, Garching, Germany

6. 研究組織

(1)研究代表者

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：9 0 2 7 0 4 4 6

(2)研究分担者

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：6 0 3 7 2 7 0 2

(3)連携研究者

山下 卓也 (YAMASHITA TAKUYA)
国立天文台・教授
研究者番号：0 0 2 1 1 6 3 1

(4)連携研究者

植村 誠 (UEMURA MAKOTO)
広島大学・宇宙科学センター・准教授
研究者番号：5 0 4 0 3 5 1 4