

令和元年6月20日現在

機関番号：82645

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25109005

研究課題名(和文)ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く 極低温SOI赤外線イメージングの開拓

研究課題名(英文)Revealing the material evolution of the universe hidden in dust: Exploration of cryogenic SOI infrared imaging

研究代表者

和田 武彦(Wada, Takehiko)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：50312202

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 98,600,000円

研究成果の概要(和文)：従来の極低温冷却高感度遠赤外線画像センサにあった、赤外光検知材料(Ge等)と読出集積回路材料(Si)との間の熱膨張差による破壊の問題を、光検知部をSiで支持したSi支持型光検知器と、Nano particle deposition (NpD) 金バンプにより克服できることを明らかにした。表面活性常温接合を用いて作成したSi支持型Ge:Ga Blocked impurity band (BIB) 遠赤外線光検知器と、cryo-SOI CMOS極低温動作読集積回路を、NpD金バンプで組み合わせることで、世界最多の画素を持つ、32x32素子遠赤外線画像センサを作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

遠赤外線画像センサの開発により、塵による吸収の影響を受けにくく、星・惑星・銀河・ブラックホール等の天体の形成過程の解明に重要であった、遠赤外線天文観測を効率的に行えるようになる。本研究は、遠赤外線だけでなく、高感度が必要な冷却型の赤外線画像センサ一般に広く適用できるため、高速赤外線カメラやハイパースペクトルイメージングなど、安全・安心分野への応用も期待できる。現在、米国に依存している高感度赤外線画像センサを国内技術のみで開発できたため、輸出規制の問題を回避できるようになる。

研究成果の概要(英文)：Far-infrared (FIR) wavelength (30-200  $\mu\text{m}$ ) is an important tool to study the formation of planets, stars and galaxies. Gallium doped germanium (Ge:Ga) extrinsic photo-conductors (PCs) and cryo-PMOS readout integrated circuits (ROICs) were used in the previous space infrared astronomical observatories. Development of FIR large format image sensor is difficult because of the following reasons: 1) Stress mechanism is required to extend the cut-off wavelength from that of Ge:Ga PC (120  $\mu\text{m}$ ) to 200  $\mu\text{m}$ . 2) Large power consumption of the PMOS ROIC limits the number of pixel. 3) Thermal expansion mismatch between Ge detector and Si ROIC damages the In bump interconnection between them.

We have developed a large format 32x32 FIR image sensor by the following key technologies: 1) Ge:Ga blocked impurity band (BIB) detector, 2) fully-depleted silicon-on-insulator (FD-SOI) cryo-CMOS ROIC, 3) a thin Ge detector on a thick Si support substrate and hybridization by nano-particle deposition (NpD) Au-bump.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：赤外線天文学 極低温集積回路 赤外線検出器 テラヘルツ SOI CMOS

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

遠赤外線観測は、塵による吸収の影響が少なく、ガスや固体微粒子からの特徴的なスペクトルによる物理・化学的診断が可能のため、星、惑星、銀河やブラックホール等の天体の形成過程の解明に極めて重要である。しかし、遠赤外線光検知器や極低温でも動作する集積回路の技術が未発達なため、遠赤外線画像センサの開発が遅れており、高感度、高効率な撮像・分光観測が行えなかった。また、天文用高感度赤外線画像センサには米国軍事技術が用いられており、日本国内での観測装置開発の障害となっていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、気球望遠鏡での観測や、将来の大型宇宙冷却赤外線望遠鏡への応用も視野に入れた、未開拓波長領域である赤外線・テラヘルツ領域での高感度多画素赤外線画像センサを、国内の技術で開発することである。特に、遠赤外線光検知器、極低温でも動作する極低温集積回路の開発、集積回路材料(シリコン)と赤外線検知材料(ゲルマニウム)間の熱膨張差による破壊を回避する技術の開発を目的とした。

### 3. 研究の方法

赤外線検知部には、動作温度が 2K と超伝導型等他の高感度遠赤外線検知器にくらべ比較的高く、天文観測用として実績の多い、不純物(Ge)の浅い準位を利用した Ge:Ga 外因性光伝導を用いた。高光吸収効率と低暗電流を両立するため、高濃度層と高純度層を組み合わせた Blocked impurity band (BIB) 構造を採用した(Ge:Ga BIB)。高品質な結晶を選んで組み合わせることができるよう、表面活性常温接合 Surface Activated bonding (SAB)法を用いて BIB 構造を形成する方法を考案した。

検知された光電流を蓄積し画像として読み出すための読み出し集積回路(readout integrated circuit; ROIC)には、過去の研究代表者らの研究により極低温でも良好な性能を持つことが明らかとなった FD-SOI CMOS を採用した。

Ge:Ga BIB 光検知器で収集した光電荷は、画素ごとに ROIC に導かれて積分される必要がある。この画素ごとの接続には Nano particle deposition (NpD) 金バンプによる 3DLSI 集積技術を用いた。従来の赤外線画像センサでは柔軟な In バンプを用いていた。In は機械的・化学的に弱く、ROIC と検知部との間に充填接着剤が必要であった。しかし、NpD Au では、接続前は柔軟で、接続時の圧力により機械的強度が発生するため、充填接着剤が不要である。このため充填接着剤との熱膨張差を考慮する必要がなくなった。

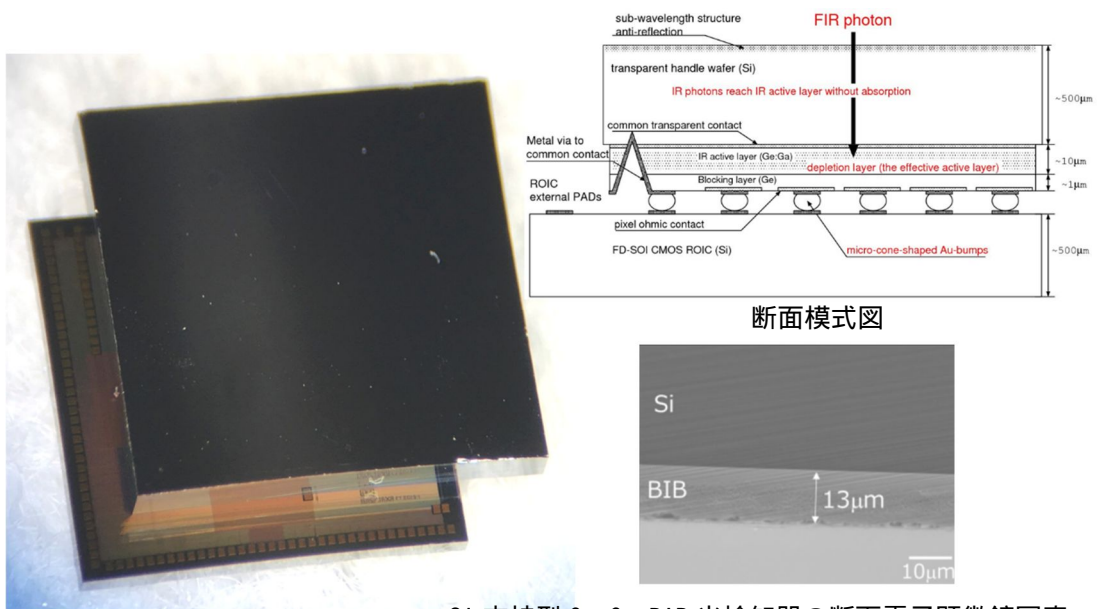
ROIC の材料(Si)と光検知部の材料(Ge)には大きな熱膨張差( $3E-6/K$ )があり、動作温度である 2K への冷却で ROIC と光検知部との接続が破壊する。この熱膨張係数差を克服するため、光検知部を Si で支持する Si 支持型光検知器を新たに考案し採用した。

赤外線領域では背景光が強いため、天体と背景との同時観測が重要であり、それを可能とする 32x32 画素以上をもつ画像センサの開発を目標とした。

### 4. 研究成果

SAB 法を用いることで Si 支持型 Ge:Ga BIB 光検知器を作成できることを実証した。FD-SOI CMOS を用いることで極低温(4K 以下)でも動作する ROIC を作成できることを実証した。NpD Au bump を用いて 9x9 素子の Si 支持型 Ge 画像センサを作成し、極低温冷却実験を行うことで、3-300K での冷却サイクルに耐えうることを実証した。32x32 素子の Si 支持型 Ge:Ga BIB 光検知器と 32x32 CTIA FD-SOI CMOS ROIC を試作し、NpD Au bump により 32x32 素子の画像センサを構成できることを実証した。

作成した Si 支持型 Ge:Ga BIB 光検知器の極低温(1.8K)での光応答と暗電流評価を行い、遠赤外線光応答として 3.1 A/W を、暗電流として 50nA (600um/pixel)を得た。光応答は天文観測に十分なものが得られたが、暗電流が多いことが問題である。暗電流は画素間の印加電圧に依存しており、結晶表面でのリーク電流の存在が示唆される。



Si 支持型 Ge:Ga BIB 光検知器の断面電子顕微鏡写真

図 1 作成した 32x32 遠赤外線画像センサ

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Suzuki, Toyoaki; Kaneda, Hidehiro; Wada, Takehiko; Ukai, Sota; Hanaoka, Misaki; Shichi, Kazuyuki; Maeda, Hiroki; Oyabu, Shinki; Watanabe, Kentaroh, Evaluation of the compensation ratio of heavily-Ga doped Ge for far-infrared detectors in Astronomy, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 57, 2018, 116701, 10.7567/JJAP.57.116701

Hanaoka, Misaki; Kaneda, Hidehiro; Oyabu, Shinki; Hattori, Yasuki; Tanaka, Kotomi; Ukai, Sota; Shichi, Kazuyuki; Wada, Takehiko; Suzuki, Toyoaki; Watanabe, Kentaroh; Nagase, Koichi; Baba, Shunsuke; Kochi, Chihiro, Evaluation of Far-Infrared BIB-Type Ge Detectors Fabricated with the Surface-Activated Wafer Bonding Technology, Publications of the Korean Astronomical Society, 査読有, 32, 2017, 351-353, 10.5303/PKAS.2017.32.1.351

Takehiko Wada, Eiichi Egami, Naofumi Fujishiro, Tomotsugu Goto, Masatoshi Imanishi, Hanae Inami, Daisuke Ishihara, Hidehiro Kaneda, Kotaro Kohno, Yusei Koyama, Hideo Matsuhara, Shuji Matsuura, Tohru Nagao, Youichi Ohyama, Takashi Onaka, Shinki Oyabu, Chiris Pearson, Itsuki Sakon, Tsutomu T. Takeuchi, Keisuke Tomita, Toru Yamada, Mitsuyosi Yamagishi, "A COSMOLOGICAL PAH SURVEY BY SPICA", Publications of the Korean Astronomical Society, 査読有, 32, 2017, 317-318, 10.5303/PKAS.2017.32.1.317

Hironobu Makitsubo, Takehiko Wada, Hirokazu Kataza, Makoto Mita, Toyoaki Suzuki, Keita Yamamoto, Fabrication and Analysis of Three-Layer All-Silicon Interference Optical Filter with Sub-Wavelength Structure toward High Performance Terahertz Optics, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 査読有, 38, 2017, 206-214, 10.1007/s10762-016-0328-z

Nagase, Koichi; Wada, Takehiko; Ikeda, Hirokazu; Arai, Yasuo; Ohno, Morifumi; Hanaoka, Misaki; Kaneda, Hidehiro; Oyabu, Shinki; Hattori, Yasuki; Ukai, Sota; Suzuki, Toyoaki; Watanabe, Kentaroh; Baba, Shunsuke; Kochi, Chihiro; Yamamoto, Keita, A Demonstration of TIA Using FD-SOI CMOS OPAMP for Far-Infrared Astronomy, Journal of Low Temperature Physics, 184, 査読有, 2016, 449-453, 10.1007/s10909-016-1551-7

Hanaoka, M.; Kaneda, H.; Oyabu, S.; Yamagishi, M.; Hattori, Y.; Ukai, S.; Shichi,

K.; Wada, T.; Suzuki, T.; Watanabe, K.; Nagase, K.; Baba, S.; Kochi, C., Development of Blocked-Impurity-Band-Type Ge Detectors Fabricated with the Surface-Activated Wafer Bonding Method for Far-Infrared Astronomy, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 184, 2016, 225-230, 10.1007/s10909-016-1484-1

Wada, T.; Arai, Y.; Baba, S.; Hanaoka, M.; Hattori, Y.; Ikeda, H.; Kaneda, H.; Kochi, C.; Miyachi, A.; Nagase, K.; Nakaya, H.; Ohno, M.; Oyabu, S.; Suzuki, T.; Ukai, S.; Watanabe, K.; Yamamoto, K., Development for Germanium Blocked Impurity Band Far-Infrared Image Sensors with Fully-Depleted Silicon-On-Insulator CMOS Readout Integrated Circuit, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 184, 2016, 217-224, 10.1007/s10909-016-1551-7

Hirokazu Kataza, Itsuki Sakon, Takehiko Wada, Yuki Sarugaku, Naofumi Fujishiro, Yuji Ikeda, Shinji Mitani, Youichi Ohyama, Naoto Kobayashi, Performance Estimation of the Mid-Infrared Camera and Spectrometer Aboard SPICA, Journal of Astronomical Instrumentation, 査読有, 4, 2015, 150001, 10.1142/S2251171715500014

[学会発表](計 29 件)

石丸貴博, 和田武彦, 金田英宏, 鈴木仁研, 長勢晃一, 池田 博一, 磯部 直樹, 山本 啓太, 馬場 俊介, 大藪 進喜, 渡部 豊喜, 花岡 美咲, 志知 和幸, 前田 浩希, 齋藤 太志, 新井 康夫, 渡辺 健太郎, 中屋 秀彦, 宮地 晃平, 大野 守史, Si 支持型 Ge BIB 検出器と FD-SOI 集積回路による遠赤外線画像センサの開発, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 2018 年  
和田武彦, 宇宙・天文と MEMS 技術: 遠赤外線天文学で使われる MEMS 光学素子/検出器, JOEM 光部品生産技術部会見学講演会 JAXA 宇宙科学研究所, 2018 年 7 月 20 日 (招待講演), 2018 年

和田武彦, 宇宙・天文と MEMS 技術, 『共用施設から生まれるイノベーション』~ ナノテクが拓く未来~ (2018/3/9); 文部科学省 平成 29 年度 微細加工ナノプラットフォームコンソーシアムシンポジウム、東京大学武田先端知ビル, 2018 年 3 月 9 日 (招待講演), 2018 年

和田武彦, Cryo-SOI 極低温集積回路と Ge:Ga 遠赤外線検知器を用いた 3D 積層遠赤外線イメージセンサの開発, TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」第 2 回 3 次元積層半導体量子 イメージセンサ研究会、つくば国際会議場、Monday, January 29, 2018 (招待講演), 2018 年

Keita Yamamoto, Takehiko Wada, Makoto Mita, Akihira Miyachi, Development of optical devices with Subwavelength Structure, 2nd Workshop on SOI Pixel Detectors (SOIPIX2017) at OIST, Okinawa, Japan 10-15 December 2017 (国際学会), 2017 年

Takehiko Wada, Koichi Nagase, Yasuo Arai, A monolithic mid-infrared image sensor with SOI technology, 2nd Workshop on SOI Pixel Detectors (SOIPIX2017) at OIST, Okinawa, Japan 10-15 December 2017 (国際学会), 2017 年

Hiroki Maeda, Toyooki Suzuki, Takehiko Wada, Hidehiro Kaneda, Shinki Oyabu, Takahiro Ishimaru, Misaki Hanaoka, Kazuyuki Shichi, Hiroki Maeda, Koichi Nagase, Toyoki Watabe, Futoshi Saito, Takuma Hirose, Kentaroh Watanabe, 2nd Workshop on SOI Pixel Detectors (SOIPIX2017) at OIST, Okinawa, Japan 10-15 December 2017 (国際学会), 2017 年

Koichi Nagase, Takehiko Wada, Yasuo Arai, Hirokazu Ikeda, Shunsuke Baba, Toyooki Suzuki, Morifumi Ohno, Takahiro Ishimaru, Development of a cryogenic readout circuit based on FD-SOI CMOS for a far-infrared astronomical image sensor, 2nd Workshop on SOI Pixel Detectors (SOIPIX2017) at OIST, Okinawa, Japan 10-15 December 2017 (国際学会), 2017 年

Takahiro ISHIMARU, Takehiko WADA, Akihira MIYACHI, Kentaroh WATANABE, Hidehiro KANEDA, Toyooki SUZUKI, Fabrication of silicon-supported germanium blocked impurity band detectors for infrared astronomy, 2nd Workshop on SOI Pixel Detectors (SOIPIX2017) at OIST, Okinawa, Japan 10-15 December 2017 (国際学会), 2017 年

Takehiko Wada, Yasuo Arai, Shunsuke Baba, Misaki Hanaoka, Takuma Hirose, Hirokazu Ikeda, Takahiro Ishimaru, Naoki Isobe, Hidehiro Kaneda, Akihira Miyachi, Koichi Nagase, Hidehiko Nakaya, Morifumi Ohno, Shinki Oyabu, Futoshi Saito, Kazuyuki Shichi, Toyooki Suzuki, Toyoki Watabe, Kentaroh Watanabe, Keita Yamamoto, Development of a far-infrared image sensor with Si-supported Ge BIB detector and FD-SOI cryo-CMOS ROIC hybridized by nanoparticle deposition Au-bump, 2nd Workshop on SOI Pixel Detectors (SOIPIX2017) at OIST, Okinawa, Japan 10-15 December 2017 (国際学会), 2017 年

馬場俊介, 長勢晃一, 和田武彦, 池田博一, 石丸貴博, 新井康夫, 大野守史, 遠赤外線イメージセンサに向けた極低温動作 32x32CTIA マルチプレクサの設計, 日本天文学会 2017 年春季年会 V243b, 2017 年 3 月 17 日、九州大学, 2017 年

石丸貴博, 鈴木仁研, 和田武彦, 長勢晃一, 馬場俊介, 宮地晃平, 渡辺健太

- 郎, Blocked Impurity Band 型 Ge 遠赤外線検出器開発の最新状況, 第 4 回宇宙ナノエレクトロニクスワークショップ, 2016 年 12 月 15 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 2016 年
- 和田武彦, シリコン基板支持型ゲルマニウム遠赤外線画像センサの開発, 「光」に関するワークショップ, 平成 28 年 12 月 1 日, 宇宙航空研究開発機構 筑波宇宙センター, 2016 年
- 長勢晃一, 遠赤外線天文観測のための極低温読み出し回路開発, 第 6 回 SOI 新学術領域研究会, 2016 年 6 月 28 日, 北海道大学, 2016 年
- 和田武彦, マイクロマシン技術を用いた赤外線天文用デバイス開発, 第 3 回宇宙ナノエレクトロニクスワークショップ, 2016 年 3 月 30 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 2016 年
- 和田武彦, 鈴木仁研, SPICA の中間赤外線・遠赤外線検出器, 第 5 回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ (招待講演), 2015 年 12 月 07 日~2015 年 12 月 09 日, 東北大学理学研究科, 仙台市
- 和田武彦, 次世代遠赤外線画像センサの開発, 南極で切り開くテラヘルツ天文学, 2015 年 11 月 18 日~2015 年 11 月 19 日, 国立天文台, 三鷹市
- Takehiko Wada, H. Kaneda, Y. Arai, S. Baba, M. Hanaoka, Y. Hattori, H. Ikeda, C. Kochi, A. Miyaji, K. Nagase, H. Nakaya, M. Ohno, S. Oyabu, T. Suzuki, S. Ukai, K. Watanabe, K. Yamamoto, Development of Far-Infrared Image Sensor, International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015) (国際学会), 2015 年 06 月 02 日~2015 年 06 月 06 日, Tohoku University, Sendai, Japan
- 花岡美咲, 金田英宏, 大藪進喜, 服部和生, 田中琴未, 鷓飼壮太, 和田武彦, 鈴木仁研, 渡辺健太郎, 長勢晃一, 公地千尋, 馬場俊介, 宇宙観測用接合型 Ge 遠赤外線検出器のレイアウトに向けた物理パラメータの決定, 日本天文学会 2015 年春季年会, 2015 年 03 月 18 日~2015 年 03 月 21 日, 大阪大学
- 公地千尋, 和田武彦, 長勢晃一, 山本啓太, 馬場俊介, 金田英宏, 服部和生, 田中琴未, 花岡美咲, 鷓飼壮太, 鈴木仁研, 渡辺健太郎, シリコン基板に保持されたゲルマニウム Blocked Impurity Band 型遠赤外線検出器の開発, 日本天文学会 2015 年春季年会, 2015 年 03 月 18 日~2015 年 03 月 21 日, 大阪大学
- 21 Misaki Hanaoka, Hidehiro Kaneda, Shinki Oyabu, Yasuki Hattori, Kotomi Tanaka1, Takehiko Wada, Toyoaki Suzuki, Kentaroh Watanabe, Koichi Nagase, Shunsuke Baba, Chihiro Kochi, EVALUATION OF FAR-INFRARED BIB-TYPE GE DETECTORS FABRICATED WITH THE SURFACE-ACTIVATED WAFER BONDING TECHNOLOGY, THE UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes, 2014 年 07 月 09 日~2014 年 07 月 11 日, Oxford, UK
- 22 Takehiko Wada, Hidehiro Kaneda, Kentaroh Watanabe, Toyoaki Suzuki, Yasuo Arai, Hirokazu Ikeda, Hidehiko Nakaya, Morifumi Ohno, Koichi Nagase, Yasuki Hattori, Koudai Kobata, Shunsuke Baba, Chihiro Kochi, Kotomi Tanaka, Misaki Hanaoka, Development of Ge BIB far-infrared image sensors with FD-SOI CMOS ROIC, Millimeter, submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VII, 2014 年 06 月 24 日~2014 年 06 月 27 日 Montreal, Canada
- 23 Takehiko Wada, ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く 極低温 SOI 赤外線イメージングの開拓, 新学術研究領域研究「3 次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」研究会, 2013 年 12 月 13 日~2013 年 12 月 14 日, 京都大学(京都府京都市)
- 24 長勢晃一, 和田武彦, 池田博一, 新井康夫, 大野守史, 遠赤外線画像センサのための極低温読み出し回路~CMOS アナログスイッチ~, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 03 月 19 日~2014 年 03 月 22 日, 国際基督教大学(東京都三鷹市)
- 25 田中琴未, 金田英宏, 大藪進喜, 服部和生, 木幡洸大, 花岡美咲, 和田武彦, 鈴木仁研, 渡辺健太郎, 長勢晃一, 公地千尋, 馬場俊介, 表面活性化常温ウエハ接合技術を用いた Ge p+i 接合型遠赤外線検出素子開発のための各層の物理特性の評価, 日本天文学会 2014 年春季年会 2014 年 03 月 19 日~2014 年 03 月 22 日, 国際基督教大学(東京都三鷹市)
- 26 山本啓太, 和田武彦, 三田信, MEMS 技術を用いた赤外線・テラヘルツ単一材料光学干渉フィルターの研究, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 03 月 19 日~2014 年 03 月 22 日, 国際基督教大学(東京都三鷹市)
- 27 Koichi Nagase, Takehiko Wada, Hirokazu Ikeda, Yasuo Arai, Morifumi Ohno, Cryogenic CMOS analog switch for far-infrared image sensors, International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2013 2013 年 12 月 02 日~2013 年 12 月 03 日 Vietnam National Satellite Center (VNSC), Melia Hotel, Hanoi, Vietnam
- 28 Takehiko Wada, Hidehiro Kaneda, Yasuo Arai, Yasuki Hattori, Hirokazu Ikeda, Koudai, Kobata, Koichi Nagase, Toyoaki Suzuki, Kotomi Tanaka, Kentaroh Watanabe, Hidehiko Nakaya, Morifumi Ohno, Shunsuke Baba, Chihiro Kochi, Development for germanium FIR image sensors, 10th International Workshop On Low Temperatures Electronics, 2013 年 10 月 14 日~2013 年 10 月 17 日 Universite Paris Diderot, Paris, France
- 29 Koichi Nagase, Takehiko Wada, Hirokazu Ikeda, Yasuo Arai, Morifumi Ohno,

Development of cryogenic readout circuit for far-infrared image sensors with fully-depleted silicon-on insulator (FD-SOI) CMOS process, 10th International Workshop On Low Temperatures Electronics, 2013年10月14日~2013年10月17日 Universite Paris Diderot, Paris, France

〔その他〕

ホームページ等

3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開 B02班

<http://soipix.jp/b02.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：金田 英宏

ローマ字氏名： Kaneda Hidehiro

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：理学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁): 30301724

研究分担者氏名：渡辺 健太郎

ローマ字氏名： Watanabe Kentaroh

所属研究機関名：東京大学

部局名：先端科学技術研究センター

職名：特任講師

研究者番号(8桁): 30523815

研究分担者氏名：石丸 貴博

ローマ字氏名： Ishimaru Takahiro

所属研究機関名：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名：研究開発部門

職名：研究開発員

研究者番号(8桁): 30788857

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：中屋 秀彦

ローマ字氏名： Nakaya Hidehiko

研究協力者氏名：池田 博一

ローマ字氏名： Ikeda Hirokazu

研究協力者氏名：鈴木 仁研

ローマ字氏名： Suzuki Toyoaki

研究協力者氏名：長勢 晃一

ローマ字氏名： Nagase Koichi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。