

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 27 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340053

研究課題名(和文)次世代遠中間赤外線検出器のための極低温読みだし集積回路の開発

研究課題名(英文)Development of cryogenic readout integrated circuit (ROIC) for next generation far-infrared imaging sensors

研究代表者

和田 武彦 (Wada, Takehiko)

独立行政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) 13,300,000円、(間接経費) 3,990,000円

研究成果の概要(和文)：従来の遠赤外線画像センサーには、読みだし集積回路(ROIC)の性能(雑音、線形性、消費電力)が不十分であったため、画素数の多い画像センサーを実現出来ないという問題があった。本研究では、FD-SOI CMOS VLSI技術を用いることで、その困難を克服し、極低温でも、低雑音、良好な線形性、超低消費電力を実現する極低温ROICの開発に成功した。まず、ROICの基礎となるMOSFETを試作し極低温での特性を評価した。明らかとなった特性を基に、回路要素である、オペアンプ、シフトレジスタ、アナログスイッチを試作した。最後にそれらを組み合わせた極低温ROICを設計試作した。極低温での特性は良好であった。

研究成果の概要(英文)：We are developing cryogenic readout integrated circuit (ROIC) for far-infrared imaging sensors. We have evaluated characteristics of MOSFET fabricated by fully-depleted silicon on insulator (FD-SOI) technology and find that both p-channel and n-channel MOSFETs show excellent performance even at cryogenic temperature (below 4K). We have designed and fabricated circuit elements required for ROICs, such as operational amplifiers, analog switch, and digital circuit. We have found that operational amplifiers reported by Nagata et al. (2009) suffers from unexpected oscillation induced by parasitic capacitance of cables between cryogenic stage and room temperature stage. We have also found that the oscillation can be eliminated by applying a source follower buffer fabricated by FD-SOI CMOS technology. We also demonstrated that the analog switch has an off-leak current that is small enough for far-infrared imaging sensors. Finally we have successfully design and fabricated 2x2 array ROIC.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：赤外線天文学 極低温 集積回路 画像センサ テラヘルツ CMOS FD-SOI

1. 研究開始当初の背景

従来のハイブリッド遠中間赤外線画像センサーでは、読みだし集積回路(readout integrated circuit, ROIC)の性能(雑音、線形性、消費電力)が不十分であったため、画素数の多い画像センサーを実現出来なかった。その原因は、従来の CMOS VLSI 技術を用いた ROIC の場合、極低温で N-ch MOSFET の動作が不安定になるため、P-ch MOSFET のみで回路を構成する必要があったためである(PMOS ROIC)。PMOS ROIC は N-ch, P-ch 両方使う CMOS ROIC に比べ、回路構成が複雑になる、ゲインが低い、消費電力が大きい、という問題があった(図-1,2)。

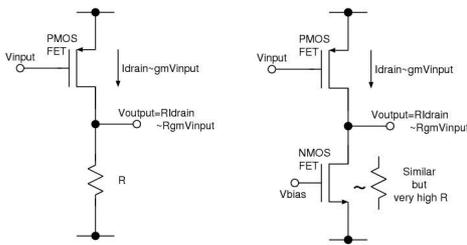


図1 PMOS アンプ(左)と CMOS アンプ(右)。PMOS アンプでは負荷に抵抗を用いるので高いゲインを得られない。CMOS アンプでは負荷に NMOS を用いることができ、高い等価抵抗、すなわち、高いゲインが得られる。

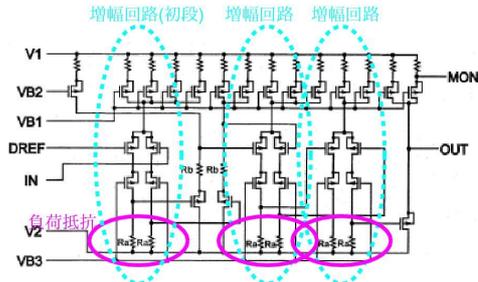


図2 PMOS オペアンプの例。十分なゲインを得るため3段構成をとった。そのため動作が不安定になり、また、消費電力が増大した。(Nagata et al. 2004, IEEE Tran. Electron. 51, 270)

2. 研究の目的

本研究では、完全空乏型 Silicon-on-insulator (FD-SOI) CMOS VLSI 技術を用いることで、前述の困難を克服し、極低温下でも、低雑音、良好な線形性、超低消費電力を実現する、極低温読みだし集積回路を開発する。これにより、大フォーマット遠中間赤外線画像センサー開発への技術的困難は解消され、遠中間赤外線天文学が飛躍的に進歩すると期待される。

3. 研究の方法

FD-SOI 技術で作られた MOSFET は N-ch も P-ch も両方、極低温下で良好に動作することが知られている(Nagata, Wada et al. 2009, AIPC 1185, 286)。しかしその特性は回

路設計を可能にするほどには明らかになっていなかった。そこで、まず、FD-SOI CMOS 技術を用いて MOSFET を試作し極低温での特性を評価した。次に、明らかとなった特性を基に、ROIC の回路要素である、オペアンプ、シフトレジスタ、アナログスイッチを試作した(図-3,4)。最後にそれらを組み合わせた極低温読み出し回路を設計試作した。

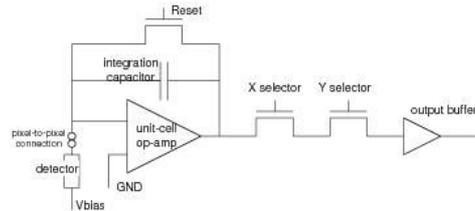


図3 ROIC の回路構成。Reset switch, X/Y selector にアナログスイッチを用いる。

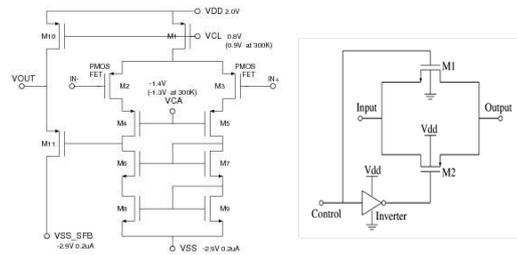


図4 設計したオペアンプ回路(左)とアナログスイッチ(右)

4. 研究成果

FD-SOI CMOS プロセスを用いて、オペアンプ、シフトレジスタ、アナログスイッチの試作に成功した(図-5)。

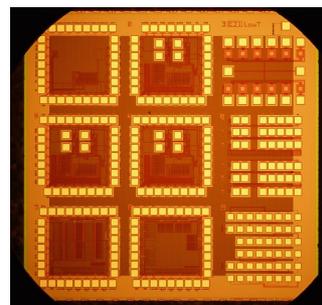


図5 試作した FD-SOI CMOS チップの顕微鏡写真

試作したオペアンプの極低温(4.2K)での性能を評価したところ、設計通り、オープンループゲイン 7000、出力電圧振幅 1V、入力換算雑音 $19 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 、という遠赤外線検出器の前置アンプとして十分な性能を持ちつつ、 $1.3 \mu\text{W}$ という超低消費電力を実現できたことが明らかとなった。これにより、 32×32 画素をもつ本格的な遠赤外線画像センサーを消費電力 1mW で実現できることが明らかとなった。この成果を査読付き論文(Nagata, Wada

et al. 2011, 発表論文 1)にまとめ出版するとともに、国際学会(LTD-14; 学会発表 7)にて発表した。

さらに、検出器のリセットや画素出力の選択に使われるアナログスイッチのリーク電流を4.2Kで測定し上限値0.12fAを得た。これは宇宙冷却赤外線望遠鏡をもちいて回折限界の解像度を持つ観測を行った場合(比波長分解能 $R=10$ 、効率 15%を仮定)の自然背景放射による光電流(1000 電子/秒)に相当し、極限的な高感度赤外線天文観測にも耐えることが明らかとなった。この結果を査読付き論文(Wada et al. 2012, 発表論文 2)にまとめ出版するとともに、国際学会(WOLTE10, 学会発表 3; ICSANE2013, 学会発表 1)にて発表した。

また、本研究で培った半導体技術を用いて、遠赤外線画像センサー実現に不可欠な、1)透明電極に関する技術と 2)反射防止に関する技術を開発した。

まず、透明電極を分子線エピタキシー(MBE)技術を用いて開発した。本研究で開発した極低温読み出し回路を遠赤外線検知基板(ゲルマニウム)と画素毎に接続した場合、読み出し回路と反対側に画素共通の電極を導入する必要がある(図-6)。一方、遠赤外線の入射は、遠赤外線検知基板側からとなる(読み出し回路に使用されているアルミ電線が遠赤外線光子を吸収してしまうため)。したがって、この共通電極は遠赤外線を通しつつ良好な電気伝導をもつという背反する特性を持つ、透明電極である必要がある。遠赤外線での透明電極は、不純物濃度が濃く、かつ、極薄な層を形成すればよいことが知られていた。ゲルマニウム遠赤外線検知器では、従来はイオン打ち込みよりボロン(B)をドーピングすることで作られていた(Fujiwara et al. 2003, Appl. Opt. 42, 2166)が、透過率は60%程度しかなかった。しかし、今回、不純物による遠赤外線吸収と電気伝導の関係をよく調べることで、不純物濃度 $5E17/cc$ 、厚さ 200nmの層を形成すると、比抵抗 $5ohm-cm$ 以下と電気抵抗が小さく、かつ、遠赤外線に対する透過率 95%以上を実現できることを理論的に明らかにし、さらに、MBE 技術をもちいて実際に透明電極を作成し、予測どおりの性能を持っていることを確認した。この成果を査読付き論文(Suzuki et al. 2012, 発表論文 3)にまとめ出版するとともに、国際会議(WOLTE10, 学会発表 2)にて発表した。

さらに、リソグラフの技術を用いて反射防止技術を開発した。本研究では、シリコン透明基板上に形成したゲルマニウム遠赤外線検知器と極低温読み出し回路を画素毎に組み合わせることを想定している(図-6)。そのため、遠赤外線はシリコン基板を透過して遠赤外線検知器に到達する。シリコンの屈折率は3.4であり、真空からシリコンに電磁波が入射する際に、30%の光が反射される。この反射は、 $1/4$ 波長の光学的厚みをもち、屈折率

が3.4の平方根の薄層を表面に形成することで0%に抑制することができる。問題は、遠赤外線波長域(30-300 μm)では、このような屈折率をもつ物質がないことであった。そこで本研究では、屈折率を物質選択で調整するのではなく、構造で調整することでこの困難を解決した。半導体技術(ドライエッチング)を用いてシリコン表面に波長より小さい(サブ波長構造)穴を多数あけ実効的に屈折率を小さくする。実際に、直径 $4.3\mu m$ の穴を間隔 $5.2\mu m$ で開ける(空隙率62%)ことで有効屈折率1.9が得られることを明らかにした。これはシリコンの屈折率の平方根に近く、反射をほぼ0%にすることに成功した。さらに表面活性化常温接合技術を用いることでサブ波長構造を多層化することに成功し、任意の波長透過特性をもつ干渉フィルタを実現できることを明らかにした。この成果を国内学会(電子情報通信学会、学会発表 5)にて発表した。

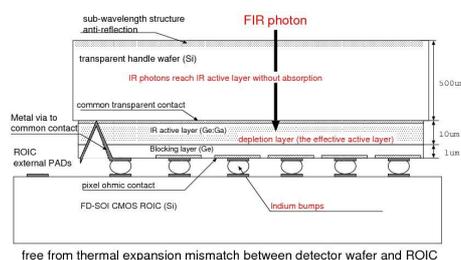


図6 本研究の目指す遠赤外線画像センサー

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 3 件)

Toyoaki Suzuki, Takehiko Wada, Kazuyuki Hirose, Hironobu Makitsubo, and Hidehiro Kaneda, "Molecular-Beam Epitaxial Growth of a Far-Infrared Transparent Electrode for Extrinsic Germanium Photoconductors", Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 査読有, 124, 2012, 823-829, 10.1086/667391

T. Wada, et al., Development of Low Power Cryogenic Readout Integrated Circuits Using Fully-Depleted-Silicon-on-Insulator CMOS Technology for Far-Infrared Image Sensors, J. Low Temp. Phys., 査読有, 167, 2012, 602-608, 10.1007/s10909-012-0461-6

Hirohisa Nagata, Takehiko Wada, et al., Development of cryogenic electronics for far-infrared astronomical focal plane array, IEICE

Trans. Commun., 査読有, E94-B, 2011,
2952-2960,
10.1587/transcom.E94.B.2952

〔学会発表〕(計 7 件)

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, Vietnam National Satellite Center, Melia Hotel, Hanoi, Vietnam

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 16 日, Universite Paris Diderot, Paris, France

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 15 日, Universite Paris Diderot, Paris, France

長勢晃一, 和田武彦, 池田博一, 鈴木仁研, 新井康夫, 大野守史, 遠赤外線画像センサーのための FD-SOI-CMOS 集積回路の特性ばらつき評価, 日本天文学会 2013 年春季年会, 2013 年 03 月 20 日, 埼玉大学

和田武彦, 槇坪宏展, 三田 信, 鈴木仁研, サブ波長構造を利用した単一材料シリコン赤外線多層干渉フィルタ, 電子情報通信学会 2013 年総合大会(招待講演), 2013 年 03 月 19 日, 岐阜大学

和田武彦, 他, 遠赤外線画像センサーのための FD-SOI-CMOS 集積回路の開発, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 日本天文学会 2011 年秋季年会

T. Wada, et al., Development of low power cryogenic readout integrated circuits using fully-depleted-silicon-on-insulator CMOS technology for far-infrared image sensors, 14th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2011/08/04, Heidelberg University

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 武彦 (WADA, Takehiko)

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

(2) 研究分担者

尾中 敬 (ONAKA, Takashi)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号: 30143358

(3) 連携研究者

永田 洋久 (NAGATA, Hirohisa)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・特定課題共同研究員

研究者番号: 20399299

鈴木 仁研 (SUZUKI, Toyoaki)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号: 30534599

金田 英宏 (KANEDA, Hidehiro)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 30301724

(4) 研究協力者

長勢 晃一, (NAGASE, Koichi)

総合研究大学院大学・物理科学研究科・学生