

氏 名 長勢 晃一

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1875 号

学位授与の日付 平成28年9月28日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 遠赤外線天文観測のための極低温読み出し集積回路開発

論文審査委員 主 査 准教授 松尾 宏
教授 川崎 繁男
教授 松原 英雄
准教授 川田 光伸
教授 新井 康夫

高エネルギー加速器科学研究科
上席研究開発員 池田 博一
宇宙科学研究所

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

論文題目：遠赤外線天文観測のための極低温読み出し集積回路開発

波長帯30-60 μm での遠赤外線天文観測を行うための、高感度・多画素イメージセンサー実現に向け、極低温(4 K)読み出し集積回路の開発を行った。本論文の第1章で科学目的とそれを達成するための性能要求について述べ、第2章では極低温読み出し集積回路の背景と設計について述べる。第3章では、設計した極低温読み出し回路の評価実験について述べる。第4章では評価実験の結果について議論し、第5章で結論を述べる。

天文学の主要課題の一つに物質進化過程の解明がある。現在の宇宙に存在する物質は、星の内部における核融合活動によって形成された重元素や塵などを起源としているため、宇宙の星形成史を調べるのが物質進化過程の解明の上で本質的である。近年では、宇宙の星形成率は赤方偏移 $z=2$ 付近にピークがあり、 $z=3$ 以遠では減衰していることが知られている。すなわち、 $z=3$ 以遠の宇宙は星の形成が徐々に増え、物質が豊かになっていく時代である。従来の観測では、星形成率の指標として星間ダスト放射(静止波長60 μm にピークを持つ連続スペクトル)が用いられてきた。しかし、Herschel 宇宙天文台などの $z>3$ でのダスト放射観測では、コンフュージョン限界のために非常に明るい銀河($> 10^{13}$ 太陽光度)しか観測できておらず、その時代の銀河の典型的な明るさは未だ不明であり、正確な星形成率の推定ができていなかった。コンフュージョン限界は、密集した点源の光応答がセンサー上で重なり合い、画像背景を明るくしてしまう現象であり、観測波長と望遠鏡口径によって決まる。このような問題に対して、次世代赤外線天文衛星では、星間ダスト放射との良い相関が示唆されている多環芳香族炭化水素(PAH)の輝線(静止波長7.7 μm)を用いてコンフュージョン限界を打破し、 $z>3$ の星形成史を明らかにする観測の提案がされている。このような観測に必要なイメージセンサーは受光素子(検出器)アレイと読み出し集積回路から構成される。前者は十分に高感度なものが実現されたが、後者においては未だ開発例が少ない。本研究では、前述した次世代の観測提案を実現しうるイメージセンサー用極低温読み出し回路の開発を目標とした。

PAH 輝線の観測によりコンフュージョン限界を十分低減することは原理的に可能であるが、遠方銀河からの微弱な輝線を検出するためには非常に高感度なセンサーが必要である。さらには、系統的かつ均質な天体のサンプリングを行うために広い範囲のサーベイ観測が必要となり、十分に多画素のイメージセンサーが要求される。本研究では、検出限界70 μJy かつ1000 画素以上のイメージセンサーが必要であると見積もった。

$z=3-6$ の遠方銀河からのPAH 輝線の観測波長は30-60 μm である。この波長帯に感度を持ち、上記の検出限界を実現しうる検出器として、GeをベースにしたBlocked-impurity-band (BIB) 検出器が挙げられる。Ge-BIB 検出器を高感度で運用するためには、暗電流雑音を低減するために極低温で用いられるが、多画素の検出器を限られた冷却パワーの下で極低温に保ち、かつ外来雑音の影響を低減するためには、検出器の直近で信号増幅と信号多重化を行う必要がある。従って、極低温環境で動作する読み出し集積回路が必要となる。また、読み出し集積回路には、冷却パワーの制限によって発熱量が制限されているため、低消費電力が求められる。さらに、検出限界についての性能要求から読み出し回路には低雑音であることが要求される。

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

Ge-BIB 検出器のように低背景光環境で高インピーダンスになる検出器に対しては、入力インピーダンスの高いMOSFETの読み出し回路が有効である。しかし、極低温環境での従来MOSFETの電流電圧特性は、ドレイン電流のヒステリシスやキックといった現象が顕著であり、安定した動作を実現することができなかつた。キック現象・ヒステリシスは、キャリア凍結したSi基板内部のポテンシャル・電荷分布が不安定になることに起因する。そのため、極低温環境で安定動作する読み出し回路を実現できず、多画素化が困難であった。

一方で、完全空乏型Silicon-on-insulator (FD-SOI) CMOSプロセスによるMOSFETは、極薄の構造のため、ゲート下が全て空乏化できる。そのため、MOSFET内に中性領域が存在せず、基板ポテンシャルや電荷分布の変動の影響を受けないのでヒステリシスの抑制が期待されていた。実際に、FD-SOI MOSFETの4 K以下での動作はPタイプ・Nタイプ共に実証されており、ヒステリシスは問題にならないことが知られている。これらの背景を踏まえ、本研究ではFD-SOI MOSFETをベースとした極低温読み出し集積回路の設計を行った。

多画素の読み出し回路では、インピーダンス変換を行う増幅回路と多重化された出力を画素毎に選択するマルチプレクサが必要である。本研究では、4.2 KでのMOSFETの電流電圧特性を参考にし、検出器光電流の電流電圧変換・インピーダンス変換を行うためのCapacitive trans-impedance amplifier (CTIA)を開発した。CTIAは、観測要求から導いた性能要求値（雑音28 e、出力電圧幅1 V、消費電力1 μ W、リセット応答時間1 s以下）の達成を目指した設計を行った。また、出力画素を選択するためのアナログスイッチとその制御回路であるシフトレジスタを設計した。シフトレジスタは4.2 Kですでに実証されているフリップフロップを用いて構成した。

次に、製作したFD-SOI CMOS極低温読み出し回路の極低温性能の評価実験を行った。CTIAの出力電圧幅・雑音・消費電力・リセット応答時間について測定を行った結果、雑音以外の項目については観測要求から導かれる回路要求性能をほぼ達成することができた。また、画素選択スイッチで用いるアナログスイッチについて、切り替え応答時間の評価を行い、1000画素のイメージセンサーを1 s以下の時間で1フレームを読み出すことができると分かった。これは、明るい天体の観測を想定した場合でも飽和する前に読み出すことができる性能であり、要求を満たす。

一方、4.2 Kで測定されたCTIA雑音は89 eであり設計値を超過している。この原因の一つとして、キック現象に関連する雑音増加現象が挙げられる。極低温におけるキック現象の消滅は自明ではなく、理論的には衝突電離が発生する高電圧領域で起こりうるからである。このことは、回路設計において改善可能であり、今後の課題である。

また、雑音性能はCTIAの電荷積分時間を増やすことで改善が可能である。本研究の測定で得られた雑音から、積分時間と雑音等価電力の関係を算出したところ、積分時間を4 s以上に増やすことで、宇宙の背景光のフォトンショット雑音を下回り（自然背景光限界）、さらに積分時間を50 s以上に増やすことで、次世代赤外線天文衛星用に想定されている超伝導ボロメータによる観測性能を上回ることが可能であるとわかった。さらに、前述のPAH輝線の検出についても1000 s程度の観測で検出可能(S/N=5)となることがわかった。

以上の設計・評価と考察により、FD-SOI CMOSプロセスをベースにした極低温読み出し回路の諸性能が明らかになった。また、本研究の極低温読み出し回路を用いることにより、Ge-BIB半導体検出器であっても、現状高感度検出器の代表と言われる超伝導ボロメータに近い雑音性能を実現できるため、次世代の高感度・多画素遠赤外線イメージセンサー開発において新たな展開をもたらすことができる。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

論文題目：遠赤外線天文観測のための極低温読み出し集積回路開発

赤外線天文衛星「あかり」やハーシェル宇宙天文台による遠方銀河の遠赤外線サーベイ観測が行われ、これまで塵（固体微粒子）に覆われて見過ごされていた赤外線銀河が、宇宙の歴史の中でどのように星形成してきたかが研究されるようになった。本研究は、これらの研究をさらに発展させるため、将来の赤外線天文衛星に搭載する広視野・高感度の観測装置の基礎技術の開発と位置付けられる。特に、多環芳香族炭化水素（PAH）に特徴的な7.7ミクロンにあるスペクトルフィーチャーの観測により $z=3$ 以遠の遠方銀河の星形成活動を明らかにするための広視野高感度の遠赤外線カメラを実現するために不可欠な、極低温（4 K）読み出し回路の開発を行ったものである。

本論文は、5つの章から構成される。第1章では、本研究の導入として、これまでに明らかにされた星形成史の観測的成果を概観するとともに、本研究で提案するPAH7.7ミクロン放射を用いて赤方偏移3以上の遠方銀河の星形成史を解明することの意義について議論されている。そして、このような観測を実現するために必要な観測装置の仕様を定め、検出システムに対する具体的な性能を議論している。

第2章では、極低温で動作する回路素子の特徴から回路設計に至るまでの議論が行われている。まず、極低温で動作する電界効果トランジスタ(MOSFET)に見られるキック現象やヒステリシス特性についての説明があり、本研究で用いる完全空乏型Silicon-On-Insulator(FD-SOI)のCMOSプロセスを用いた回路の優位性についての詳細な議論が行われている。そして、FD-SOI CMOSプロセスを用いたMOSFETの極低温特性の測定とモデルとの比較、本研究で用いるオペアンプの設計とその評価結果が示されている。そして、本研究の主要部分となる極低温読み出し回路の設計について、回路要素（アナログスイッチ、インバーターなど）から電荷積分型増幅回路（CTIA）を用いた集積型の極低温読み出し回路の設計および期待される性能についての議論が展開される。

第3章では、本研究で製作した読み出し回路の主要要素の極低温評価が行われており、実証実験の詳細および結果の評価について、実測した画像データおよびグラフにより明示されている。その結果、回路の基本的な動作はすべて確認され、CTIA回路のゲイン、ダイナミックレンジ、スイッチング特性、消費電流などはすべて仕様を満たす結果が得られている。唯一、雑音の評価においては、77 Kにおいては仕様を満たす値が得られているものの、4 Kにおいて過剰雑音が測定されている。

第4章は、前章で得られた極低温回路特性により、将来の天文衛星搭載観測装置として十分な性能が得られているかの検証が行われている。CTIAゲインの非線形性についてはバイアス電圧の極性に注意することで十分な線形成が得られることが示された。雑音特性については相関二重サンプル（CDS）による雑音低減やリセットスイッチに起因する雑音なども考慮することで、目標とする仕様をほぼ満たすことができることが示された。4 Kで測定された過剰雑音については、その原因について素子特性および回路構成の点から詳細

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

の検証が行われ、また、観測的には積分時間を長くすることで十分な観測性能が得られることが示された。

以上のように、本研究は将来の天文衛星搭載観測装置としての広視野・高感度の遠赤外線カメラの主要部分となる極低温読み出し回路システムの主要技術要素について、その設計から実証実験までを行い遠赤外線カメラの実現性を初めて明確にしたものである。その結果として、ダイナミックレンジなどで、超電導ボロメータ等他の検出技術に勝る観測性能が期待され、今後の衛星計画の立案の上でも大きなインパクトを与え、遠方宇宙の星形成史の研究に大きな成果をもたらすものと期待される。

なお、赤外線天文学分野における目標達成の観点から開発するハードウェアの仕様を導出し実験的検証を議論した論文であり、理学の学位が妥当である。したがって、審査委員全員が博士論文（理学）として合格であると判断した。