

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18206042

研究課題名 (和文) 超伝導テラヘルツカメラの極低温電子回路の開発

研究課題名 (英文) Development of Cryogenic Readout Electronics for Superconducting Terahertz Camera

研究代表者

松尾 宏 (MATSUO HIROSHI)

国立天文台・先端技術センター・准教授

研究者番号：90192749

研究成果の概要：超伝導テラヘルツカメラの極低温電子回路として、ガリウム砒素半導体の接合型電界効果トランジスタ (GaAs-JFET) を用いた極低温で動作する集積回路を開発した。GaAs-JFET 極低温電子回路は、積分型アンプ、マルチプレクサ、およびシフトレジスタの各集積回路から構成され、32 チャンネルのマルチチップモジュールを構成することで、1000 素子規模の超伝導テラヘルツカメラの読み出しに用いることができる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2007年度	12,100,000	3,630,000	15,730,000
2008年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
年度			
年度			
総計	37,300,000	11,190,000	48,490,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：テラヘルツ、極低温回路、集積回路、GaAs 半導体、超伝導検出器

1. 研究開始当初の背景

サブミリ波および遠赤外線領域を含むテラヘルツ領域では超伝導体を用いた 2 次元アレイ型検出器の開発が欧米を中心に展開されていた。特に、熱型検出器を用いたボロメータアレイの開発で、超伝導遷移端 (TES) をセンサーとし超伝導量子干渉素子 (SQUID) による多重化読み出しが進められた。一方で、ボロメータは動作温度、ダイナミックレンジおよび SQUID の安定動作条件の実現のために多くの時間を費やしており、量子型検出器を用いた 2 次元アレイの開発が待たれていた。

我々は当初よりサブミリ波帯の量子型検出器として超伝導トンネル接合 (SIS 接合)

を用いたフォトン検出器の開発を進めてきた。サブミリ波帯 SIS フォトン検出器は、動作温度、ダイナミックレンジおよび動作速度でボロメータに比べ優れた特性を持ち、検出感度 (NEP) としても 10^{-16} W/Hz^{0.5} が実現された。常温動作の検出器に比べ 5 桁以上高い感度である。また、超伝導薄膜技術を用いるため、検出器の 2 次元アレイ化が容易であり、研究協力者である理化学研究所の有吉らにより 36 素子の 2 次元アレイが製作されている。

大きな問題点としては、SIS フォトン検出器に適した 1K 以下の極低温で動作する 2 次元アレイの読み出し回路が存在しないこと

であった。

SIS フォトン検出器および半導体検出器などのリーク電流が少ない高抵抗検出素子には電流雑音の低い半導体読み出し回路が適しているが、これまで実現されている回路はシリコン半導体による MOS 型 (Si-MOS) トランジスタなどで、動作温度の下限が約 2K、大きな入力雑音電圧と電流電圧特性の異常 (ヒステリシス、キック) が問題である。一方、ガリウム砒素半導体の電界効果トランジスタ (GaAs-JFET) は、1 K 以下の低温特性および入力雑音に優れていることが確認され、極低温集積回路の開発が期待されていた。

2. 研究の目的

サブミリ波およびテラヘルツ領域における超伝導を用いた高感度 2 次元アレイ (超伝導テラヘルツカメラ) を実現するために必要な極低温電子回路の開発を目的とする。

検出器としてサブミリ波帯 SIS フォトン検出器を用い、極低温回路素子として n 型ガリウム砒素半導体の電界効果トランジスタ (GaAs-JFET) を用いる。超伝導テラヘルツカメラの応用分野として高感度のサブミリ波帯天体観測装置およびテラヘルツ領域の高感度高速のイメージングを想定し、画素数 1000 素子規模の 2 次元アレイを実現するための極低温電子回路を開発する。

3. 研究の方法

GaAs-JFET の極低温特性の評価および SIS フォトン検出器の積分回路を用いた読み出し特性の評価を行い、極低温集積回路に求められる性能を明らかにする。研究期間中に GaAs-JFET を用いた回路の試作を 3 回行うことで、増幅回路の試作、積分型読み出し回路の試作、集積型読み出し回路の試作を順次行い、超伝導テラヘルツカメラの極低温電子回路を実用化する。

- (1) GaAs-JFET の極低温特性を明らかにする。
- (2) SIS フォトン検出器の特性から極低温回路に必要な仕様を明らかにする。
- (3) 3 回の極低温回路の設計・試作により、超伝導テラヘルツカメラに必要な極低温電子回路を実現する。

4. 研究成果

(1) GaAs-JFET の極低温特性

絶対温度 4.2K 以下における GaAs-JFET の電流電圧特性および雑音特性の測定を行った。その結果、GaAs-JFET は 4.2K から 0.3K までの動作温度範囲で電流電圧特性に変化がなく、Si-MOS トランジスタで見られるようなヒステリシスやキックなどの異常特性もないことが確認された。雑音特性については、トランジスタのゲートサイズと閾値電圧を適切に選ぶこと、および赤外光照射により雑音

を低減できることを確認した。これらの評価により、GaAs-JFET が極低温における低雑音低消費電力回路素子として優れた特性を示すことが明らかとなった。GaAs-JFET では、閾値電圧の異なるデプリーション型およびエンハンスメント型トランジスタを集積回路に組み込むことが可能なため、電圧レベルの調整と低消費電力化が可能である。

スイッチ素子としての特性評価のため、エンハンスメント型の GaAs-JFET の測定を行い、ゲート容量についてはゲートサイズ ($W/L = 5 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$) で 50fF 以下、ドレインのオフ抵抗は $1T\Omega$ 以上の値を得ている。これらの値は GaAs-JFET が極低温におけるスイッチ素子として優れた特性を持つことを示している。また、低電圧領域 (V_{ds}) においてもゲート電圧に対してスムーズな抵抗変化を示すため (図 1)、低消費電力の集積回路が実現可能である。

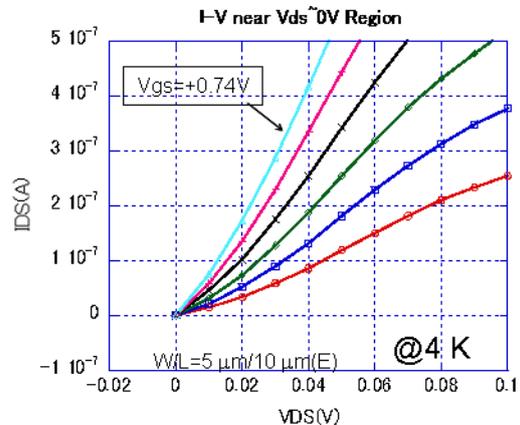


図 1. GaAs-JFET の極低温低電圧領域における電流電圧特性。Vgs=0.64-0.74V、閾値電圧は約 0.50V である。

(2) SIS フォトン検出器の積分回路試験

極低温回路に必要な特性を明らかにするために、常温で動作する電荷蓄積型読み出し回路 (CTIA) による SIS フォトン検出器の読み出し試験を行った (図 2)。この結果、増幅率 2000 倍以上の増幅回路を用いることで、SIS 検出器の安定動作が確認された。また、AC 結合型 CTIA 回路を構成することで SIS フォトン検出器に必要な低バイアス電圧 (約 1mV) を安定に印加できることを確認した。

SIS フォトン検出器の性能を引き出すために必要とされる極低温回路の動作パラメータは以下ようになった。

- ・動作温度 1K 以下
- ・アンプ増幅率 2000 倍以上
- ・雑音電圧 $1 \mu\text{V}/\text{Hz}^{0.5}$ 以下 (@1Hz)
- ・消費電力 $10 \mu\text{W}/\text{ch}$ 以下
- ・検出器電流 1-10nA at $V_{\text{bias}} = 1\text{mV}$
- ・積分容量 10pF
- ・積分回路リセット周期 1kHz 以上

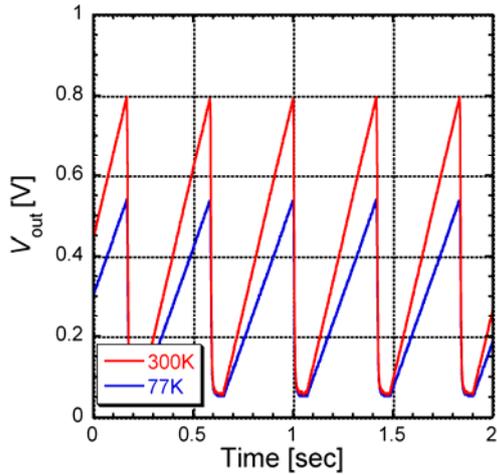


図2. SIS フォトン検出器の積分読出試験。入射光は 300K および 77K の黒体放射。

(3) SIS フォトン検出器の交流磁場特性
 本研究を開始する頃（平成 18 年 4 月）、SIS フォトン検出器 9 素子アレイのサブミリ波望遠鏡搭載試験を実行した。このとき問題となったのが、望遠鏡駆動モーターの発生する交流磁場による雑音混入であった。実験室での交流磁場特性の評価により、検出器と読み出し回路の配線で交流磁場干渉のあることが明らかとなり、クライオスタットに磁気シールドを施すこと、および極低温回路の導入により検出器と読み出し回路をできるだけ近づけることが重要であることが明らかになった。

(4) 第 1 次試作

ゲートサイズの異なる GaAs-JFET、様々な設計の 1 段増幅回路、抵抗およびコンデンサの試作を行い、その特性を評価した。多数の GaAs-JFET の測定により、静特性および雑音の評価を行い、閾値電圧のばらつきが 100mV 程度、閾値電圧の再現性が 30mV 程度であることがわかった。また、雑音および閾値電圧が熱緩和 (TC: Thermal Cure) および赤外光照射により制御できることを確認した。

(5) 第 2 次試作

様々な 2 段増幅回路、4 チャンネル AC 結合型 CTIA 回路、マルチプレクサ回路、基本デジタル回路、シフトレジスタなど、超伝導テラヘルツカメラの実現に必要なすべての回路要素の試作を行った (図 3 を参照)。2 段増幅回路の増幅率については 700 倍程度の値が得られたが、この段階では目標とする 2000 倍には届いていない。GB 積としては、位相補償回路込みで 500kHz 以上の値が得られており十分な速度が確保できた。この 2 段増幅回路を用いた 4 チャンネル AC 結合型 CTIA 回路の動作試験に成功し、多素子検出器の読み出

し回路の見通しを得た。また、GaAs-JFET の優れたスイッチング特性を反映して、マルチプレクサおよびシフトレジスタについても、期待される動作特性が確認された。なお、シフトレジスタに用いたデジタル基本回路としてエンハンスメント型とデプリーション型トランジスタを組み合わせた DCFL (Direct Coupled FET Logic) を採用している。

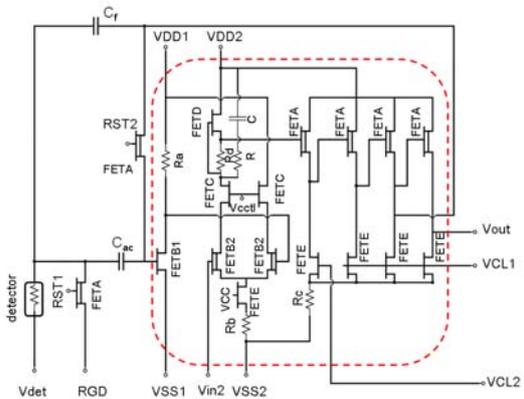
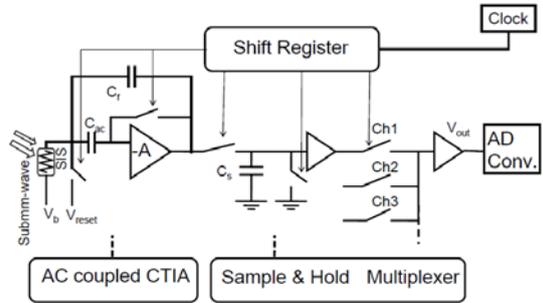


図 3. (上) 超伝導テラヘルツカメラの読み出し回路概念図。(下) AC 結合型 CTIA 回路の詳細。点線枠が増幅回路を示す。

(6) 第 3 次試作

32 チャンネルの読み出し回路モジュールの概念設計に基づき、16ch-AC 結合型 CTIA 回路、32ch マルチプレクサ、32ch シフトレジスタの設計・試作を行った (図 4)。第 2 次試作で問題となったアナログアンプ増幅率の向上、集積度の向上、および消費電力の低減を目標に設計を進めた。その結果、アナログアンプの増幅率として 2000 倍以上の値が実現し、SIS フォトン検出器の安定動作条件が満たされることとなった。32 チャンネルの読み出し回路モジュールの設計を行い、消費電力が 100-200 μ W となった。このモジュールを複数搭載することで 1000 素子規模の超伝導テラヘルツカメラの実現が可能である。

(7) 将来展望

我々は、GaAs-JFET を用いた極低温集積回路技術が極低温で動作する高感度検出器の読み出し回路に用いることができることを示した。今後、本格的な超伝導テラヘルツカメラの実現には、SIS フォトン検出器の大規模

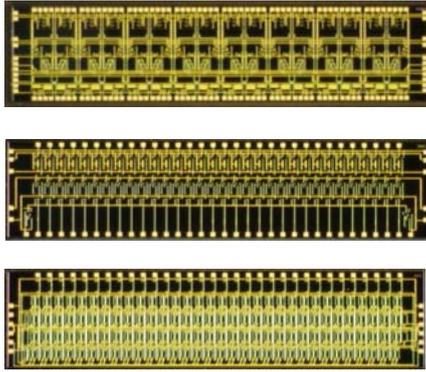


図4. 第3次試作で実現した集積回路（それぞれ2mm×8mm）。上から、16ch-CTIA回路、32ch マルチプレクサ、32ch シフトレジスタ。

2次元アレイの実現が不可欠である。本研究で開発を行った集積型読み出し回路の消費電力は、3-6 μ W/chを実現しているが、1000素子規模の2次元アレイでは数mWの発熱となる。このため、読み出し回路の更なる低消費電力化あるいは検出器との低熱伝導配線技術の開発が不可欠である。

GaAs-JFET 極低温集積回路技術は、天文観測装置に限らず、多くの高感度検出技術への応用が期待される。特に、テラヘルツ領域では、高感度のイメージング検出器により高速でダイナミックレンジの高い画像取得が実現することで、様々な分野への応用展開が期待される。

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 13件）

- ① Nagata, H., Matsuo, H., Hibi, Y., Kobayashi, J., Nakahashi, M., Ikeda, H., Fujiwara, M., “GaAs cryogenic readout electronics for high impedance detector arrays for far-infrared and submillimeter wavelength region”, 2008, Cryogenics, doi:10.1016/j.cryogenics.2008.12.023 査読有
- ② Hibi, Y., Matsuo, H., Arai, H., Nagata, H., Ikeda, H., Fujiwara, M., “The cryogenic multiplexer and shift register for submillimeter-wave digital camera”, 2008, Cryogenics, doi:10.1016/j.cryogenics.2008.11.008 査読有
- ③ Fujiwara, M., Sasaki, M., Nagata, H., Matsuo, H., “Optical control of low frequency noise behavior in cryogenic GaAs junction field effect transistor”, 2008, Cryogenics, doi:10.1016/j.cryogenics.2008.12.011 査読有
- ④ Fujiwara, M., Nagata, H., Matsuo, H., Sasaki, M., “Optical reduction of low frequency noise in cryogenic GaAs junction field effect transistor”, 2008, Appl. Phys. Lett. 93, 043503 (3 pages) 査読有
- ⑤ Matsuo, H.; Hibi, Y.; Nagata, H.; Nakahashi, M.; Murakoshi, Y.; Arai, H.; Ariyoshi, S.; Otani, C.; Ikeda, H.; Fujiwara, M., “System design of submillimeter-wave imaging array SISCAM”, 2008, SPIE 7020, 702015 (9 pages) 査読無
- ⑥ Nagata, H.; Kobayashi, J.; Matsuo, H.; Hibi, Y.; Nakahashi, M.; Ikeda, H.; Fujiwara, M., “Development of cryogenic GaAs AC-coupled CTIA readout for farinfrared and submillimeter detectors”, 2008, SPIE 7020, 70202Q (10 pages) 査読無
- ⑦ Matsuo, H., Mori, Y., Murakoshi, Y., Ariyoshi, S., Ezawa, H., Hibi, Y., Kobayashi, J., Nagata, H., Nakahashi, M., Otani, C., “Realization of submillimeter-wave imaging array with superconducting direct detectors”, 2008, J. Low Temp. Phys. 151, 304-309 査読有
- ⑧ Nagata, H., Kobayashi, J., Matsuo, H., Nakahashi, M., Kobayashi, K., Ikeda, H., Fujiwara, M., “Fabrication of cryogenic readout circuits with n-type GaAs-JFETs for low temperature detectors”, 2008, J. Low Temp. Phys. 151, 1022-1027 査読有
- ⑨ Matsuo, H., Nagata, H., Mori, Y., Kobayashi, J., Okaniwa, T., Yamakura, T., Otani, C., Ariyoshi, S., “Performance of SIS photon detectors for superconductive imaging submillimeter-wave camera (SISCAM)”, 2006, SPIE 6275, 627504 (9 pages) 査読無
- ⑩ Mori, Y., Okaniwa, T., Nakahashi, M., Ariyoshi, S., Otani, C., Sato, H., Matsuo, H., “Development of superconductive imaging submillimeter-wave camera with nine detector elements (SISCAM-9)”, 2006, SPIE 6275, 627523 (12 pages) 査読無
- ⑪ Nagata, H., Kobayashi, J., Matsuo, H., Fujiwara, M., “Progress on GaAs cryogenic readout circuits for SISCAM”, 2006, SPIE 6275, 627527 (10

pages) 査読無

- ⑫ Matsuo, H., “Future prospects of superconducting direct detectors in terahertz frequency range”, 2006, Nucl. Instr. and Meth. A, 559, 748-750 査読有
- ⑬ Nagata, H., Kobayashi, J., Matsuo, H., Akiba, M., Fujiwara, M., “Cryogenic Readout Integrated Circuits for Submillimeter-wave Camera”, 2006, Nucl. Instr. and Meth. A, 559, 823-825 査読有

[学会発表] (計 10 件)

- ① 松尾宏「超伝導テラヘルツカメラを実現するn型ガリウム砒素電界効果トランジスタを用いた極低温電子回路の開発」、第56回応用物理学関連連合講演会、2009年3月31日、筑波大学 筑波キャンパス
- ② 藤原幹生「赤外光による極低温動作トランジスタの低雑音化」、第56回応用物理学関連連合講演会、2009年3月31日、筑波大学 筑波キャンパス
- ③ 日比康詞「将来の飛翔体搭載を見据えたテラヘルツ波デジタルカメラのための極低温電子回路システムの現状」、日本天文学会2009年春季年会、2009年3月26日、大阪府立大学 (大阪府堺市)
- ④ 永田洋久「超高感度テラヘルツカメラ用極低温電子回路の開発」、電子情報通信学会2009総合大会、2009年3月20日、愛媛大学 (愛媛県松山市)
- ⑤ 永田洋久「高感度テラヘルツカメラ用GaAs-JFET極低温読み出し回路の開発」第55回応用物理学関連連合講演会、2008年3月28日、日本大学理工学部 船橋キャンパス
- ⑥ 日比康詞「テラヘルツ波デジタルカメラのための極低温電子回路システム」、日本天文学会2008年春季年会、2008年3月25日、国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都渋谷区)
- ⑦ 松尾宏「電波天文へのミリ波・テラヘルツ波応用 (招待講演)」、電子情報通信学会2008年総合大会 チュートリアルセッション「ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システムの進展」2008年3月19日、北九州学術研究都市 (福岡県北九州市)
- ⑧ 松尾宏「テラヘルツカメラの飛翔体搭載へ向けて」日本天文学会2007年秋季年会、2007年9月27日、岐阜大学 (岐阜県岐阜市)
- ⑨ 松尾宏「SISフォトン検出器によるテラヘルツ帯天体観測 (招待講演)」第54回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「超伝導検出器による電磁波-X線-生体分子分光計測技術の展望」2007年3月

28日、青山学院大学 相模原キャンパス

- ⑩ 永田洋久「ASTE搭載サブミリ波カメラ極低温電子回路の開発」日本天文学会2006年秋季年会、2006年9月19日、九州国際大学 (福岡県北九州市)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称:「光を用いた極低温動作トランジスタの雑音低減方法」

発明者: 藤原幹生、佐々木雅英、松尾宏、永田洋久

権利者: 情報通信研究機構、自然科学研究機構、

種類: 特許権

番号: 12/406,297

出願年月日: 平成21年3月18日

国内外の別: 国外 (米国)

[その他]

- ① 招待講演「天体観測を目的としたテラヘルツ帯イメージング技術」、松尾宏、平成19年度日本分光学会テラヘルツ部会シンポジウム2007年11月22日、IPC生産性国際交流センター (神奈川県葉山町)
- ② 招待講演“Submillimeter-wave Camera using SIS Photon Detectors” Matsuo, H. et al., IRMMW-THz2006 2006年9月18日、上海 (中国)
- ③ ホームページ
<http://thz-www.mtk.nao.ac.jp/ja/top/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 宏 (MATSUO HIROSHI)

国立天文台・先端技術センター・准教授

研究者番号: 90192749

(2) 研究分担者

(平成18年度~平成20年度)

永田 洋久 (NAGATA HIROHISA)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・研究員

研究者番号: 20399299

藤原 幹生 (FUJIWARA MIKIO)

情報通信研究機構・基礎先端部門・

主任研究員

研究者番号: 70359066

(平成18年度~平成19年度)

池田 博一 (IKEDA HIROKAZU)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・教授

研究者番号: 10132680

(平成19年度～平成20年度)
日比 康詞 (HIBI YASUNORI)
国立天文台・先端技術センター・研究員
研究者番号：00377970

(3) 連携研究者
(平成20年度)
池田 博一 (IKEDA HIROKAZU)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部
・教授
研究者番号：10132680