

42年を振り返って

○渡部豊喜^{A)}

^{A)} 教育・研究技術支援室 装置開発技術系

概要

昭和50年3月、名古屋大学に採用され、早川研（理学部物理U研）に配属となりました。U研は宇宙物理学を研究しているグループですが、地上から観測できない波長域のX線、赤外線をロケットなどの飛翔体を用いて観測しますが、この観測装置開発は大きな比率をしめておりました。私は検出器とその読み出し回路開発を主な業務としておりました。当時はOPAMPなどのICが出始めた頃で、それ以来積極的にICを用いた回路設計をしておりましたが、ASTRO-Fではそれまでの「動くICを使う」から民生のLSI技術を基に「動くICを開発する」ことを担当しました。これまでいろいろな業務を担当して来ましたが、特に印象の強い「動くICを開発する」業務の紹介をして、42年のまとめとさせていただきます。

1 ASTRO-Fとは

ASTRO-Fは、FISと呼ばれる遠赤外線観測装置とIRCと呼ばれる近・中間赤外線カメラを搭載した本格的な赤外線天文衛星として開発されました。この衛星は2006年2月2日鹿児島内之浦町のロケット発射試験場からM5ロケットにより打ち上げられ「あかり」と命名されました。搭載されているFIS検出器は約-271℃（4K）に、IRC検出器は約-240℃に冷却されますが、そのために液体ヘリウム（LHe）と冷凍機が搭載されており、観測時間はLHeの持ち時間で決まります。また、全天カタログ作成をするために衛星は極軌道となっています。

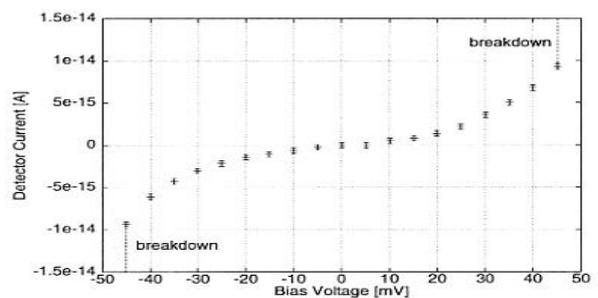
ASTRO-Fに関する詳細は宇宙科学研究所のホームページを参照してください。

http://www.jaxa.jp/projects/sat/astro_f/index_j.html

2 「動くIC」について

FISの検出器はゲルマニウムにガリウムを少量ドーピングした結晶（Ge:Ga）です。赤外線が入射すると、光量に比例した電子が励起され、電流が流れます。しかしGe:Gaは、光量と電流（感度）がバイアス電圧で変化するため、バイアス電圧を一定にする必要があります。図1にGe:Gaのバイアス電圧対感度変化を示します。また、読み出すためには電流を積分し、変化量を見ることでより暗い領域の観測が可能となります。これがCTIAと呼ばれる手法です。これにより電流積分とバイアス電圧安定化が可能となりますが、実現するためには、反転アンプが必要となります。検出器を高感度で使用するには「動くIC」

図1 Ge:Gaのバイアス電圧対感度特性



が必要なのです。また、この「動くIC」を検出器の最も近くに配置するためお互いを直接貼り合わせる方法を取りました。これで配線距離は最短となります。これはバンピングと呼ばれる技術で、メーカーの特許となっています。当然両者を張り合わせた状態で検出器を動作させるとICも4K以下となりますが、IC動作で検出器温度が変化しては困ります。ちなみにGe:Ga検出器は20x5と15x5の175ピクセルあり、それぞれにCTIAアンプが接続されるため、ICの総発熱量も問題となります。以下に「動くIC」に求められる性能を示しますと、1) 検出器と同じ温度(4K以下)で動作、2) 1c h当たりの消費電力が10μW以下、3) アンプの増幅率は1000程度、4) 等価入力雑音電圧1μV/√Hz @1Hz、などの目標が上げられます。当然外部からの熱流入を減らすため、マンガニン線やステンレスシールド線などを用いて配線されますがICの動作環境は厳しくなります。残念ながらこのような条件を満たす「動くIC」は市販されておりませんので開発が必要です。

3 単体素子の評価、改良

3.1 MOSFET

今回、民生LSI製造技術をベースとして、極低温読み出し回路を開発します。メーカーの協力を得ながら、MOSFETのLHe温度での、特に1μW程度の消費電力時における特性測定を実施しました。多くのタイプの特性測定とMOS構造の改良等を繰り返すことで、図3

図2 改良前の静特性

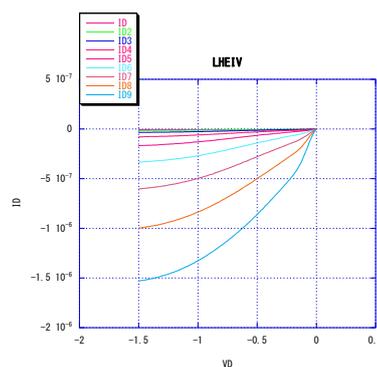
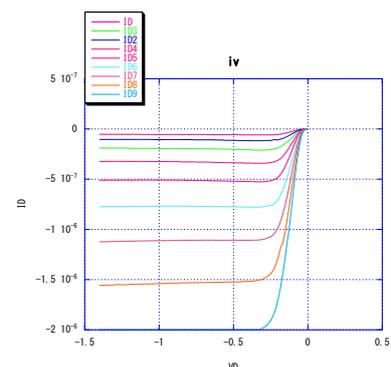


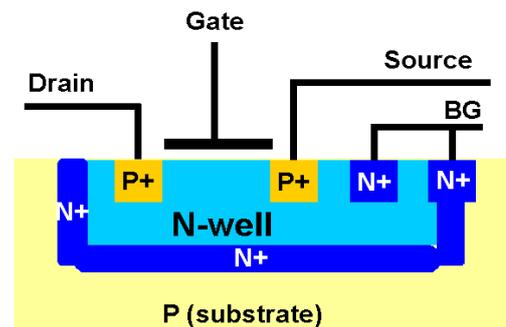
図3 改良後の静特性



の特性を持つトランジスタが開発できました。図2は改良前の特性で、飽和領域の改善が見られます。

図4は、この改良型トランジスタの構造を示します。この構造を実現するには、BiCMOS技術を用いましたが、この手法も半導体メーカーの特許となっています。

図4 改良型MOSFETの構造



3.2 抵抗

基本回路素子である抵抗、コンデンサもMOSFET同様に温度特性を測定しました。コンデンサは室温において130pFであったものが4Kでは126pFと3%程度の容量変化が有りましたが、製造上のバラつき程度であることがわかりました。抵抗も測定したところ室温とLHeにおける変化率は約1.8倍程度となりました。数回の試作においてもこの値に大きな変化は無く安定していることがわかりました。

4 C T I A回路設計と評価

単体素子評価試験を基に p M O S F E T のみによる差動アンプ回路の設計、試作を行いました。基本的な回路構成として、差動入力回路、レベルシフト回路と2段増幅回路、出力はソースフォロア回路と電源供給の為の定電流回路で構成されています。

この I C でフィードバック回路を構成し、10 倍の増幅回路を製作し、4 K の測定結果を図 6 に示します。試験では 1 2 H z の信号を用い、入出力電圧を精度よく測定し、計算により I C の増幅率を求めます。図 7 にこの I C と検出器ダミー抵抗 (6 4 G) による C T I A の 4 K における試験結果を示します。使用したバイアス電圧は 1 2 m V です。

図 6 4 K におけるアンプ回路の入出力波形

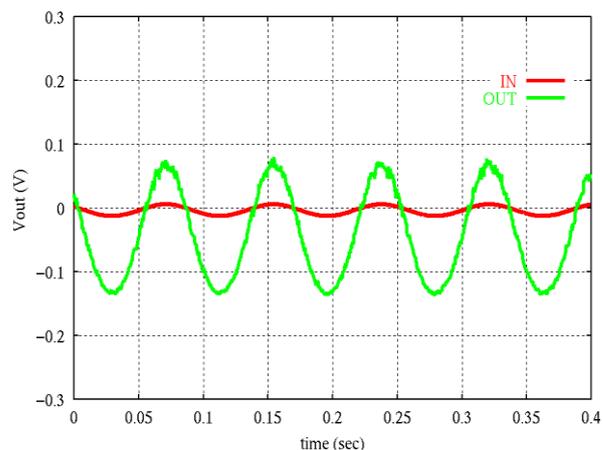


図 8 4 K における C T I A 動作試験

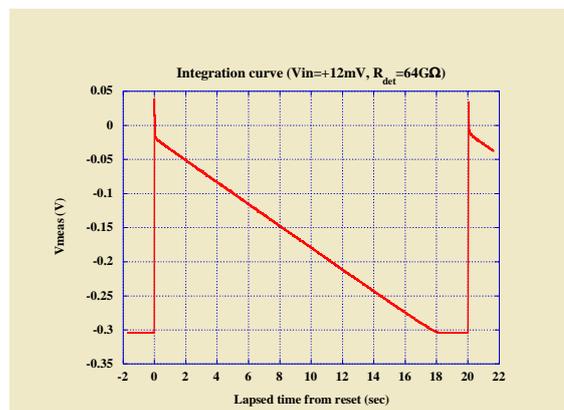
5 まとめ

A S T R O - F 衛星に搭載される検出器の読み出し I C 開発を行い、4 K で動作する I C の試作に成功しました。以下の動作条件において増幅率 3 0 0 倍、消費電飾 9 . 6 μ W を達成できました。また、ノイズレベルは $\sim 3 \mu$ V / $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 H z が得られた。I C の動作条件特に低温下ではバラつきが大きく期待通りの性能とならない I C も見られた。

・ 動作条件

電源電圧 : $\pm 1 . 8$ V

調整電源 V B 1 : + 0 . 3 0 6 V、V B 2 : + 0 . 4 0 2 V、V B 3 : - 2 . 9 V



6 参考文献

- [1] Dierickx,B.,Simoen,E.,Vermeiren,J.,Cos,S.,Claeye,C.et.al.,OPTIMIZATION OF CMOS TECHNOLOGY AND DESIGN FOR DEEP CRYOGENIC ANALOG CIRCUIT,ESA ELECTRONIC COMPONENT CONFERENCE,ESA SP-313,43,1991
- [2] Doi, Y. ,Hirooka,S., Sato,A. ,Kawada,M. ,Shibai,H. et.al., LARGE-FORMAT AND COMPACT STRESSED GE:GA ARRAY FOR THE ASTRO-F(IRIS)MISSION,Advanced in Space Resarch2001,in press
- [3] Glidden, R. M.,Lizotte,S.C. ,Cable,J.S. ,Mason,L.W. and Cao,C.,Optimization of Cryogenic CMOS Processes for Sub-10K Applications, Proc. of SPIE, Vol.1684,2,1992
- [4] Hiromoto,N. ,Fujiwara,M. ,Shibai,H. ,Hirao,T. ,Nakagawa,T. et.al.,Ge:Ga Far-infrared Photoconductor 2D Direct Hybrid Array, Proc. of SPIE , Vol.3354,48,1998
- [5] Noda,M., H.,Shibai, T.Watabe, T.Hirao, H.Yoda, et.al Evaluation of charge integrating amplifiers with silicon

MOSFETs for cryogenic readout, Proc. of SPIE, Vol.3354,247,1998.

- [6] Shibai, H. ,ASTRO-F: THE INFRARED IMAGING SURVEYOR (IRIS) MISSION, Advances in Space Resarch, 2001.,in press
- [7] Takahashi, H. ,Shibai, H. ,Kawada, M. ,Hirao, T. ,Watabe, T. et.al.,FIS:far-infrared surveyor on board ASTRO-F(IRIS),Proc of SPIE, Vol4013,47,2000.
- [8] Young, E.T. ,Davis, J.T. ,Thompson, C.L. ,Reike, G.H. ,Rivlis, G. et.al.,Far-infrared imagingarray for SIRTf.,Proc. of SPIE Vol.3354,57,1998
- [9] T.Hirao, Y.Hibi, M.Kawada, H.Nagata, H.Shibai, T.Watabe, M.Noda, and T.Nakagawa CRYOGENIC READOUT ELECTRONICS WITH SILICON P-MOSFETS FOR THE INFRARED ASTRONOMICAL SATELLITE, ASTRO-F, Advances in Space Resarch, 2001., in press