計測システム研究会2021@九州大学

液体アルゴンTPC用 信号エレクトロニクスの 低温性能向上のための開発

岩手大学院 総合科学研究科 小坂琢人 岩手大^A、KEK^B、Open-it^C、神戸大理^D 坂下健^{BC}、田中真伸^{BC}、長谷川琢哉^{BC}、岸下徹一^{BC}、庄子正剛^{BC}、身内賢太郎^{CD}、 成田晋也^{AC}、根岸健太郎^{AC}、李沢祥太^{AC}、窪田諒^{CD}、東野聡^{CD}

序論 研究目的

3次元飛跡検出器(TPC:Time Projection Chamber)を用いた、

液体アルゴンTPC(LAr-TPC)による、

長基線ニュートリノ振動研究、陽子崩壊探索研究、

・**陰イオンガスTPC(NIµTPC)**による、暗黒物質探索実験 などが計画、進められている。



様々な検出器で汎用的に用いることが可能な ASIC技術に基づく信号読み出しエレクトロニクス LTARS(Low Temperature Analog Readout System) を開発した。

信号読み出しエレクトロニクスの開発目標

本発表では、LAr-TPCでの使用を想定した性能について説明する。



LTARSの回路構成



chipレイアウト図

Vth Com \times SER ADC \times PZC Shape ТΧ デジタル信号処理部 アナログ信号処理部 1ch分の回路構成

アナログ信号処理部

- ・電荷有感型前置増幅器(CSA)…電荷電圧変換を行う。
- 比較器(Comp)…CSAの出力の大きさに応じてゲインの **自動切り換え**を行う。
- ・ポールゼロキャンセル回路(PZC)…ハイパスフィルタを 用い長い時定数をキャンセルする。
- ・ 波形整形回路(Shaper)…信号の増幅、波形の整形、帰還 抵抗値を調整することで時定数の切り換えを行う。

デジタル信号処理部

- ・ ADC…AD変換(8bit)を行う。
- SER…シリアライザでデータのシリアル化を行う。
- TX…高速伝送、ノイズ対策のためLVDSで伝送を行う。

信号読み出しエレクトロニクスの設計仕様

LTARS設計仕様

Parameter	High Gain(HG)	Low Gain(LG)	
Peaking Time	1μs(Fast),4μs(Slow)		
Conversion Gain	10mV/fC	0.5mV/fC	
Dynamic Range	±80fC	±1600fC	
ENC	<3000e-	<62500e-	

- ・Peaking Time…波形の立ち上がりからピークまでの時間
- Conversion Gain…出力電圧/入力電荷
- ・Dynamic Range…入出力値の線形性が取れている範囲
- ・ENC…検出器容量300pFを想定した入力等価雑音電子数

上記の仕様のもと、LTARS2018を開発し、 アナログ信号処理部の性能評価を行なった。 その結果から改良を図る、LTARS2020を開発した。

特性評価試験セットアップ



- ・パルスジェネレータより特性評価用ボードへパルス電圧を入力する。
 (電圧電荷変換により電荷入力)
- オシロスコープでアナログ出力をモニタ、波形データを取得する。

アナログ信号処理部の室温試験結果



アナログ出力波形

Parameter		High Gain(HG)	Low Gain(LG)	
Peaking Time		1.2µs	1.0µs	
Conversion Gain	正極性	10.0mV/fC	0.6mV/fC	
	負極性	10.7mV/fC	0.65mV/fC	
Dynamic Range		±100fC	±1600fC	
ENC		2700e-	37000e-	
設計仕様				

- Peaking Time : 1µs,
- Conversion Gain : 10mV/fC(HG), 0.5mV/fC(LG)
- Dynamic Range : ±80fC(HG), ±1600fC(LG)
- ENC : <3000e-(HG), <62500e-(LG)

各パラメータが仕様を満たしている。 アナログ信号処理部の性能は室温で運用可能なレベルである。

低温試験セットアップ



- LArで満たされた低温容器内に特性評価用ボードに搭載したLTARS2018
 を配置。
- 特性評価用ボードのアナログ出力を低温容器外のオシロスコープに接続し 波形データを取得する。

低温試験結果



低温時アナログ出力波形

低温環境での測定結果

- Peaking Time : 1.6µs
- Gain : 6.6mV/fC

室温での結果と比較すると、 Peaking Timeは約**60%増加** Gainは約**40%低下**と 低温での**性能劣化**が見られた

温度の低下により**トランジスタの閾値電圧が上昇**、それにより デバイスの動作点が変化してしまい、 **想定されたバイアス電流が供給できていなかったことが原因**

論文: LTARS: analog readout front-end ASIC for versatile TPC-applications 2020 JINST 15 T09009

低温シミュレーション

基板バイアス効果を利用してトランジスタの閾値の変化を模擬 的に再現する独自のシミュレーション手法

- 各トランジスタのパラメータを変更する代わりに、基板の電
 圧を変更する。
- 実測値と同様の性能の変化を再現することができた。



基板バイアス効果 Trの閾値電圧が基板の電圧により変動すること $V_{th} = V_{th0} + \gamma(\sqrt{|2\Phi_F + V_{SB}|} - \sqrt{|2\Phi_F|})$ V_{th} : Trの閾値電圧、 V_{th0} :室温でのTrの閾値電圧、 γ :基板バイアス効果係数、 Φ_F :シリコンのフェルミ準位、 V_{SB} : ソース-基板間電圧

室温と低温でのアナログ出力波形の比較 ・特性評価用ボード(SIRONEKO)に実装している素子の影響 によりLAr温度の測定での波形が幅を持っている

改良版ASIC (LTARS2020)



chipレイアウト図

LTARS2020 LTARS2018の改良版、低温性能向上を目指す

<変更点>

- •フィードバック機構を用いたバイアス回路により、ASIC内部でバイアス電流を生成、供給することができる。
 - 低温環境でトランジスタの閾値電圧が変化しても、ASICには一定のバイアス電流が供給される。

低温シミュレーションによりLAr温度での性能の検証、 低温試験により低温環境での動作の確認を行った。

低温シミュレーション

基板バイアス効果を考慮した低温シミュレーションで LTARS2020の低温性能の検証を行なった。

- ・室温と低温での違いは見られず、**性能の変化はない。**
- 各パラメータに関して低温でも仕様を達成している。

- 液体窒素(-196℃)で満たされた低温容器内に評価用ボードに搭載した LTARS2020を配置。
- パルスジェネレータより評価用ボードへパルス電圧を入力する。
- ・評価用ボードのアナログ出力を低温容器外のオシロスコープに接続し波形データを取得する。

アナログ出力波形の比較

- CSAの帰還抵抗の値を調整することで、低温環境下でも室温時と同様のアナログ出力波形を取得することができた。
 - CSAの帰還抵抗はトランジスタを使用しており温度 変化によって変化するため
- ゲインの自動切り替え機能も
 確認できた。

LTARS2020は低温環境でも室温 と同様の動作をすることが確認で きた。

再実験での波形の変化

低温再実験での波形の変化

室温に戻した際の波形

再度低温試験を行なった際、 波形が変化してしまい再現性が 取れない結果となった。

室温に戻し波形を取得したがこ ちらも変化していそうである。

まだ原因はわかっておらず、 調査をしている。

そのため、トランジスタレベル での低温性能を行った。

トランジスタ単体の低温試験

- LTARSで使用している、 silterra180nmプロセスの 長さと幅の異なる様々な大 きさのトランジスタを配置 したTEGchipを作製した。
- nmos、pmosともに12個
 ずつを試験した。

TRTEGchip

- 評価基板をBNCボードをケーブルで繋ぎ、スイッチングマトリクス
 とソースメータを使用し各トランジスタのId-Vg特性を測定した。
- ・室温、低温×3(入れてすぐ、30分後、1時間後)、室温に戻した際の 計5回の測定を行った。
- ・96×5(1回失敗した)の半田付けでケーブルを自作した。

※データがガタついているがこれは測定系の問題だと思われる。

- ・現在、データの解析中である。
- nmosから1つ試験結果例を示す。
- ・ 低温時、閾値のシフト、I-Vの傾きの変化などがみられた。

まとめ

LAr-TPC、NIµTPCで汎用的に用いる信号読み出しエレクトロニクスLTARSの開発 を行なっている。

LTARS2018

- ・室温では要請値を概ね達成できたが、低温環境での性能の劣化が見られた。 LTARS2020(改良版LTARS2018)の開発
- フィードバック機構を用いたバイアス回路により、ASIC内部でバイアス電流を 生成、供給することで、低温環境下でも室温と同様の動作することを確認した。
- 再度試験を行なった際、波形の変化が見られた、原因を探っている。
- トランジスタ単体の低温試験
- 様々な大きさのトランジスタの低温試験を行なった。低温時、閾値のシフト、ト Vの傾きの変化などがみられた。

今後の予定

- ・ 低温での安定動作に向けた評価試験
- トランジスタ単体での低温性能評価

backup

ゲインの自動切り替え

- CSAの出力 < Vth
 → High gain mode
 CSAの出力 > Vth
- ・CSAの出力 > Vth
 - \rightarrow Low gain mode

Vth:コンパレータの閾値電圧(変更可能)

