



JAEA-Technology

2007-004



JP0750020

**高速二次元ガス中性子検出器用の特定
用途向け集積回路 (ASIC) の設計**

Design of an Application Specific Integrated Circuits (ASIC) for
Two-dimensional Position Sensitive Neutron Detectors

山岸 秀志

Hideshi YAMAGISHI

量子ビーム応用研究部門

中性子制御・検出系開発研究グループ

Neutron Detectors and Optical Devices R&D Group

Quantum Beam Science Directorate

February 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

高速二次元ガス中性子検出器用の特定用途向け集積回路(ASIC)の設計

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門

中性子産業利用技術研究ユニット

山岸 秀志

(2007年1月4日受理)

大強度陽子加速器における強力パルス中性子ビームの散乱実験用として、ヘリウム-3ガスを中性子有感物質とした高速二次元中性子検出器（マイクロピクセルガスチェンバ、MPGC）システムの開発を進めている。MPGCシステムでは、中性子検出素子上に数100 μm 間隔のマトリックス状で配置された検出ピクセルから個別に信号が出力されるため、500チャンネル以上の高速極小アナログ信号を並列にリアルタイムで計測処理する必要がある。このような多チャンネルのアナログ信号処理に従来の電子回路モジュールを適用することは、S/Nの低下及び装置が膨大になり構成上不可能である。上記のことから、MPGC信号処理に最適化した特定用途向け集積回路（ASIC）を開発、製作するため、その回路設計と作動シミュレーションを実施し、性能評価を行った。

Design of an Application Specific Integrated Circuits (ASIC) for
Two-dimensional Position Sensitive Neutron Detectors

Hideshi YAMAGISHI

Neutron Technology R&D Center
Quantum Beam Science Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 4, 2007)

Two-dimensional position sensitive neutron detectors that have performances of a fast response and a very small spatial resolution are required for various neutron scattering experiments using high-intensity pulse-neutron sources in a high-intensity proton accelerator facility. We put forward the development of a micro-pixel gas chamber (MPGC) filled with helium-3 gas as the two-dimensional position sensitive neutron detector. The MPGC provides fast responses and very small signals and requires more than 500 signal channels. Therefore, development of an application specific integrated circuit (ASIC) is essential for processing of multi-channel signals from the MPGC. Design and study of the ASIC was performed.

Keywords: Neutron Detector, Neutron Position Sensitive Detector, Neutron Two-dimensional Position Detector, ASIC, Nuclear Electronics, Neutron Scattering, Neutron Imaging

目 次

1. 序論	1
2. ASICの設計と基礎性能	2
2.1 ASICの優位性	2
2.2 MPGC検出器用ASICの設計	2
2.2.1 MPGC素子の出力信号	2
2.2.2 MPGC検出器用ASICの回路構成	2
2.3 ASICの周波数特性とS/N比の評価	4
3. ASICの作動シミュレーション	7
3.1 高速電荷増幅器部	7
3.2 波形整形増幅器部及びベースライン補正部	7
3.3 波高弁別部及びLVDS出力	8
3.4 アナログ出力	9
4. 結論	14
謝 辞	15
参考文献	15

Contents

1. Introduction -----	1
2. Design and basic performances of the ASIC -----	2
2.1 Advantage of the ASIC -----	2
2.2 Design of the ASIC for MPGC detector system -----	2
2.2.1 Signal pulses provided by MPGC device -----	2
2.2.2 Circuit composition of the ASIC for MPGC detector system -----	2
2.3 Evaluation of frequency characteristics and S/N ratio for the ASIC -----	4
3. Operating simulation of the ASIC -----	7
3.1 Fast charge amplifier -----	7
3.2 Shaping amplifier and base-line restorer -----	7
3.3 Discriminator and LVDS driver -----	8
3.4 Analog output -----	9
4. Conclusion -----	14
Acknowledgment -----	15
References -----	15

1. 序 論

高速、高位置分解能型二次元中性子検出器を開発するため、ヘリウム-3 (^3He) ガスを主成分とする混合ガスを封入したマイクロピクセル型ガスチェンバ(MPGC)システムの開発を進めている。MPGCシステムの開発には、その信号読み出しに使用するASICの開発が必要となる。その理由は以下の通りである。Fig.1 及び 2 に作動原理図として夫々MPGCセンサ部とMPGC計測システム構成を示す。MPGC

素子は、絶縁フィルム基板に $400\ \mu\text{m}$ 間隔でマトリックス状に粒子検出用ピクセル電極を微細加工技術を用いて配置した中性子検出素子である。MPGC素子は Fig.1 に示すようにガス耐圧容器内に装着され、耐圧容器には ^3He 混合ガスが封入される。中性子の検出は下記の方法で行われる。圧力容器に入射した中性子と ^3He 原子との反応によりプロトン (P) とトリトン (T) の荷電粒子が発生される。そのPとTがガス粒子を電離してイオンと電子を発生させる。中性子検出は上記の電子をMPGC素子で収集、ガス増幅をし、電気信号パルスに変換して読み出す方法で行う。MPGC素子から出力される信号パルスは、おおよそ 15×10^{-15} [C] の極めて微小な、且つ $30\ \text{ns}$ 幅程度の高速パルスである。このため、我々が開発しているMPGCシステムでは、高いS/N及び高速性を実現するため、Fig.2 に示すようにマトリックス状に並べられた検出ピクセルをライン毎にその出力信号を個別に読み出す方式を採用している。この結果、出力信号ライン数は500チャンネル以上になっている。このように多チャンネルの高速微小アナログ信号を並列にリアルタイムで夫々増幅し、高いS/Nを持ってデジタル信号化するには、ASICの開発が必要不可欠である。このため、MPGCシステムに最適なASICの設計を行い、その性能評価を行った。

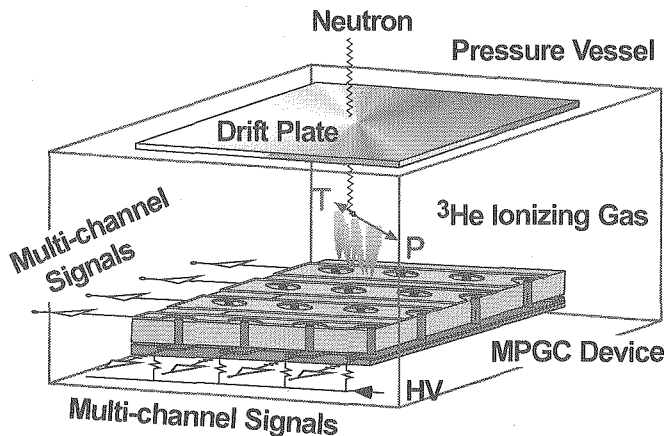


Fig.1. Principle of the MPGC for two-dimensional neutron measuring.

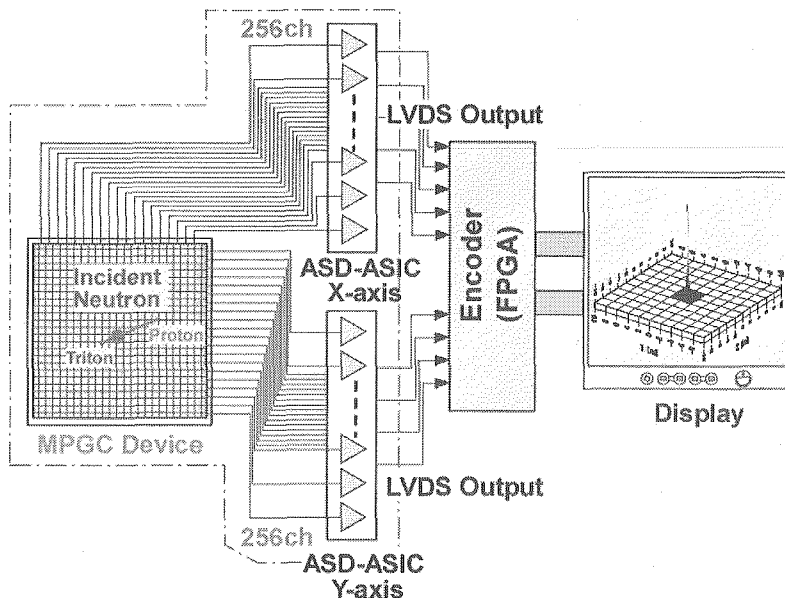


Fig.2 Schematic diagram of two-dimensional neutron measuring system with the MPGC.

している。この結果、出力信号ライン数は500チャンネル以上になっている。このように多チャンネルの高速微小アナログ信号を並列にリアルタイムで夫々増幅し、高いS/Nを持ってデジタル信号化するには、ASICの開発が必要不可欠である。このため、MPGCシステムに最適なASICの設計を行い、その性能評価を行った。

2. ASICの設計と基礎性能

2.1 ASICの優位性

ASIC(Application Specific Integrated Circuit、特定用途向け集積回路)はその名の通り、使用される信号処理に最も適した電子回路網を設計し、それを集積回路(IC)化したものを指す。数100あるいは数1000チャンネルのような多チャンネルの信号処理系を必要とする計測システムにおいて、それをディスクリートトランジスタを用いて製作した電子回路モジュールで構成しようとする、装置が膨大になり製作コスト及び据付スペース的にも現実的でないばかりか、高いS/Nが要求される微小信号処理を行うシステムでは、必要性能を実現することが困難である。ASICでは5mm角程度の小さなICチップに10数チャンネル以上、即ち電子回路モジュールを数10個分の信号処理系を組み込むことが可能である。ASICを用いることにより、15cm角のプリント基板で100チャンネル以上の信号処理系が製作可能になり、システムを大幅にコンパクト化できる。ASICでは微細加工技術を用いて電子回路網を製作できる結果、高速作動及び高いS/Nを有した高性能回路を実現できる。更にASICは極めて小電力で作動させることができるため、回路発熱による温度上昇も防げる。

2.2 MPGC検出器用ASICの設計

2.2.1 MPGC素子の出力信号

MPGC検出器では、1. 序論で述べたように中性子と ^3He 原子との反応で発生したPとTの電離作用を利用して中性子を検出する。PとTのMPGC検出器内ガス中における飛程は数mmに達する。このため電離電荷はMPGC検出ピクセル10数個以下に分散して収集される。この結果、1つの検出ピクセルから出力される電気信号は極めて小さいパルスになってしまう。MPGC素子から出力される信号パルスは、Fig.3に示すように半値幅(FWHM)が30ns程度、最頻波高が $0.5\mu\text{A}$ で立下りが指数関数をした極めて高速の微小な電流パルスである。

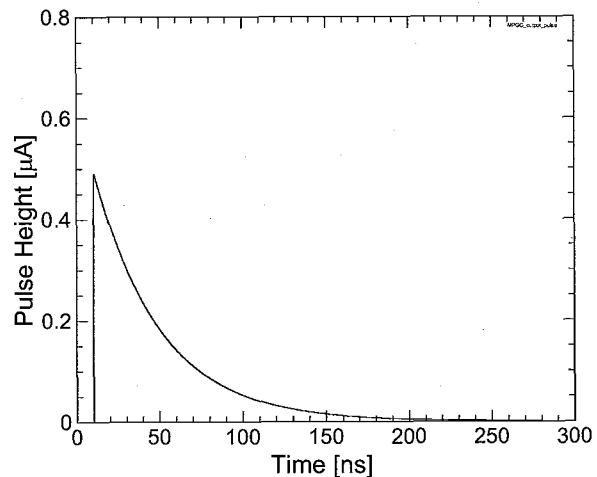


Fig.3. Output pulse shape provided from the MPGC device.

2.2.2 MPGC検出器用ASICの回路構成

GaAs化合物半導体を用いることを想定して、S/Nが最善になるようにASIC回路を設計した。GaAs半導体は低雑音、高速及び低消費電力で作動する優れた特徴を有している。Fig.4に設計したASICの回路構成を示す。作動用DC電源は±3Vである。図中①から②の範囲が

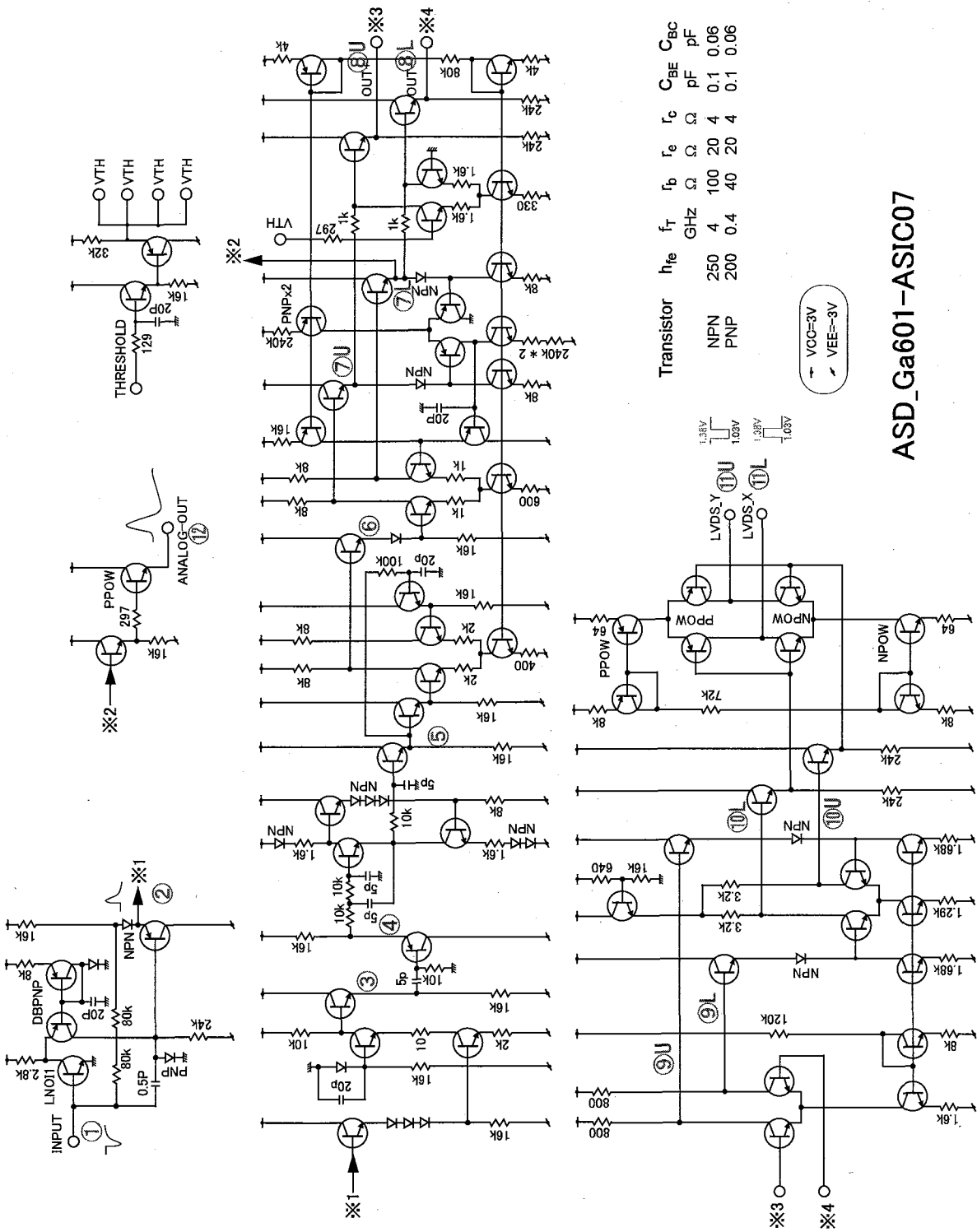


Fig.4. Circuit diagram of the ASIC for MPGC detector system.

高速電荷増幅器部(Fast charge amplifier)、②から⑥の範囲が波形整形増幅器部(Shaping Amplifier)、⑥から⑦の範囲がベースライン補正部(Base Line Restorer)、⑦から⑧の範囲が波高弁別部(Discriminator)、⑧から⑩の範囲がLVDS(Low Voltage Differential Signaling)出力部である。⑫はアナログ信号出力である。

電荷増幅器ではゲインを高く取るため帰還キャパシタンスを0.5 pFとし、高速性を確保するため積分時定数を80 nsとした。また、この電荷増幅器は正負両極性の入力パルスを増幅可能である。波形整形増幅器ではS/Nを最善にし、且つ高速性を得るため時定数50 nsの微分1段及び積分3段で構成した擬似ガウシアン波形整形とした。ベースライン補正回路では高速電流スイッチ方式により31.7 mV/μsの高速補正とした。波高弁別器では20 mVから800 mVの閾値(Threshold)電圧で0.7から39 fCの入力パルスが弁別できるように設計した。この入力パルスはMPGC出力波高にすると0.024 μAから1.3 μAに相当する。

LVDS出力部は規格に従いFig.5に示すように設計した。出力は2線式で、3.5 mAの電流駆動型である。LVDS レシーバー側では100 Ωで終端し、インピーダンスマッチングされる。100 Ω終端抵抗の両端電圧は、Upper側(Fig.5回路図に示す⑩H側)がLVDSのHigh出力で1.38 V、Lower側(Fig.5回路図に示す⑩L側)がLVDSのLow出力で1.03 Vである。また、ASICへの入力パルスの極性が変わるとLVDS出力のHigh出力とLow出力が入れ替わるので、レシーバー側で処理することが必要になる。

アナログ信号出力は波形整形増幅器から取っているため、バイポーラ出力パルスである。入力パルスが正極性のときアナログ信号出力は負極性パルスとなり、入力極性が変わると反転する。アナログ信号出力端はエミッター出力としているので、2 kΩを介して-3 Vdc電源に接続する必要がある。Fig.6を参照。

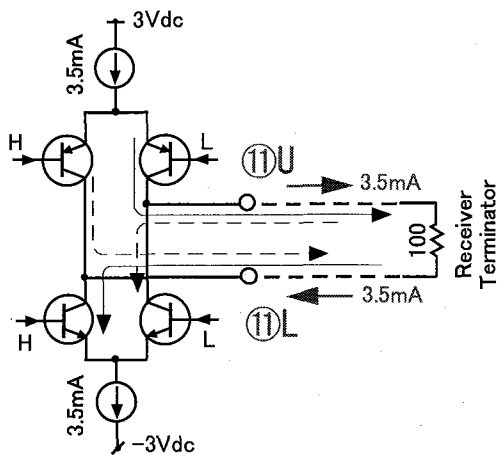


Fig.5. LVDS Driver.

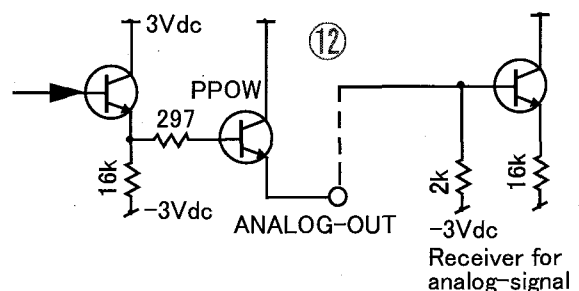


Fig.6. Receiver for analog-signal.

2.3 ASICの周波数特性とS/N比の評価

Fig.7に高速電荷増幅器のフィードバック抵抗値Rfを20 kΩから450 kΩまで変化させた時、高速電荷増幅器の出力におけるMPGC信号パルス波高がどのように増加するか計算した結

果を示す。抵抗の小さい領域ではパルス波高が大きく変化するが、大きくなるに従ってその増加が少なくなることを示している。Rfが405kΩで出力パルス波高が最大になり、それ以上ではパルス波高が低下する。これはRfが405kΩ以上ではフィードバック抵抗として機能しなくなるためである。MPGC素子の場合では、Rfが160kΩ以上で波高の上昇が非常に少なくなり、160kΩに於ける波高は最大パルス波高の85%以上に達する。この結果から電荷増幅器の高速性を考慮して、Rfを160kΩに決定した。

ASICのS/N特性を議論するには、MPGC信号パルス、高速電荷増幅器部及び波形整形増幅器部のそれぞれの周波数帯域特性がどのようになっているか知る必要がある。Fig.8に各部の周波数帯域特性の計算結果を比較して示した。設計したASICの波形整形増幅器の時定数は50nsとしたが、図では参考のため10ns、20ns及び80nsについての計算結果も合わせて示した。

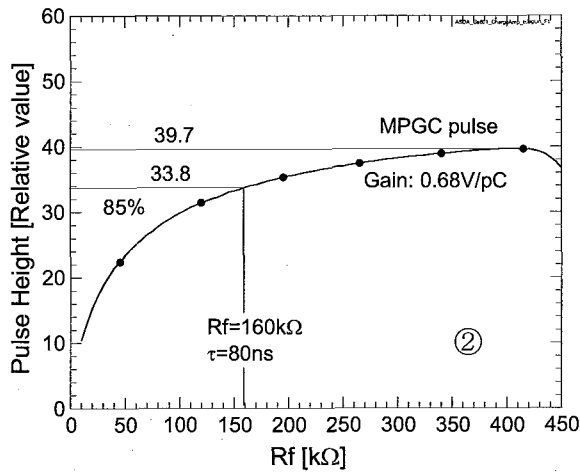


Fig.7. Pulse height at outlet of the charge amplifier depended on Rf.

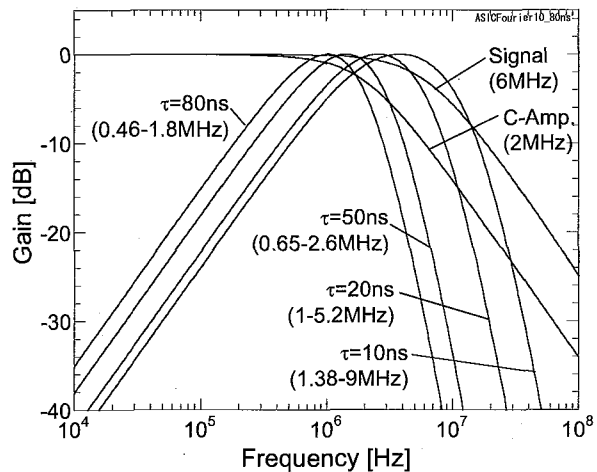


Fig.8. Band width of MPGC signal pulse and the ASIC.

信号パルス及び高速電荷増幅器の高域周波数帯域はそれぞれ6MHz、2MHzである。高速電荷増幅器の周波数帯域を2MHzに選定した理由は後に述べる。上図の計算結果が示すように、波形整形増幅器の周波数帯域は波形整形時定数が50nsの時、0.65MHzから2.6MHzであり高速電荷増幅器の高域周波数帯域を充分カバーしていることがわかる。時定数80nsでは少し低周波数側に偏っている。また、時定数20ns以下では、高域周波数帯域が高過ぎて、S/N的に不利であることを示している。

設計したASICがどの程度のS/N改善性能を有するかシミュレーションにより評価した。評価は、式2.1に示すフーリエ変換法を用いて、既存のMSGC(Micro Strip Gas Chamber)で測定された出力信号を本ASIC回路で信号処理した時の入出力パルス波形を計算し、その結果を比較する方法で行った。

$$f_o(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_s(\omega) \cdot F_c(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad \text{----- (2.1)}$$

ここで、 $F_s(\omega)$ はフーリエ変換された出力信号の関数で、 $F_c(\omega)$ はフーリエ変換されたASIC回路の伝達関数である。

Fig.9にASICのS/N性能を評価するために行った計算結果を示す。本ASICを用いたパルス計測では、ノイズをリジェクトして中性子信号パルスのみを計測する必要があるので、ここでのS/N比は中性子信号パルスのピーク値とノイズパルスの最大値の比となる。図中の上段の波形はMSGCシステムを用いて中性子を実際に測定した出力波形である。MSGCから得られる中性子信号パルスは小さいため、S/N比が1.73とかなり低いことを示している。ガンマ線検出器用に開発されたASICでは、ガンマ線検出器の出力信号が大きいことから高速パルス整形した電荷増幅器の出力信号を直接波高弁別する構成としている。中性子検出器にこのASICを適用して、電荷増幅器の出力信号を直接波高弁別するとディスクリレベルを上げる必要がある結果、中性子検出効率を大幅に低下させることになる。

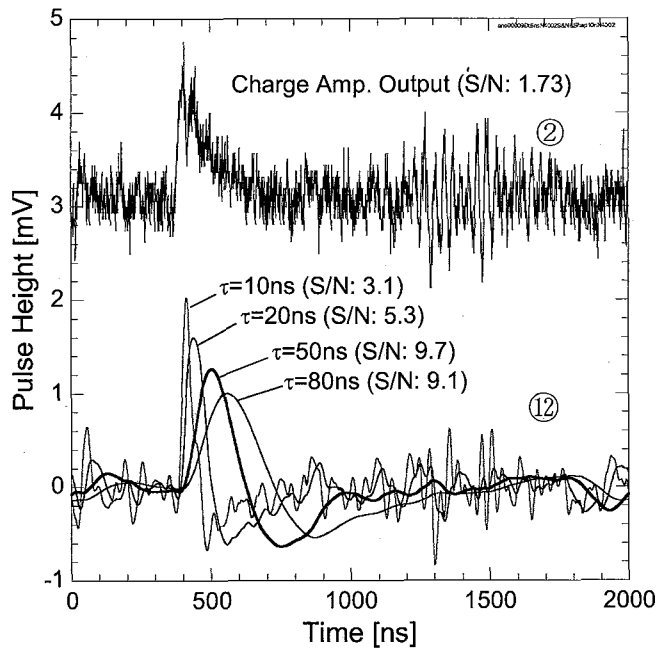


Fig.9. Pulse shapes of neutron signals measured by using MSGC device and at outlet of the pulse shaping amplifier with T.C. of 10ns, 20ns, 50ns and 80ns.

図の下段に示した4つのパルス波形は、上段のパルスを擬似ガウシヤンパルス整形した波形である。擬似ガウシヤンパルス整形は微分1段と積分3段で構成し、波形整形時定数を10ns、20ns、50ns及び80nsに変えて、S/N比を比較した。この結果、波形整形時定数を50nsの場合にS/N比が9.7で最も良いこと、また、電荷増幅器出力と比較するとS/Nが5.6倍改善されることが分かった。

3. ASICの作動シミュレーション

設計したASICの作動を確認するため、Spiceを用いてシミュレーションを行った。PN及びPNPトランジスタにはGaAs系のトランジスタを使用することを想定して、Fig.4に示した特性を用いて計算した。以下にその結果を示す。

3.1 高速電荷増幅器部

Fig.10及びFig.11にシミュレーションに用いた正負の入力パルス波形を示す。これらのパルスはMPGC素子の電離パルス波形を模擬したもので、半値幅が30nsで立下りが指数関数の電流パルスである。シミュレーションは電流パルスの波高を正負の両極性で0.25 μ Aから3 μ Aの範囲で変化させて行った。

Fig.12及びFig.13は入力パルスが正極性の時及び負極性の場合における高速電荷増幅部の出力波形である。製造後のASICではこの出力は外部端子に出されないため、ASICの内部特性となる。入力波高が1 μ Aの時、高速電荷増幅部の出力波高は38.7mVである。従ってこの波形における増幅部の電流ゲインは38.7k Ω 相当となる。また、この波形における電荷増幅部としてのゲインは0.98V/pCである。

Fig.14は入力信号の周波数に対するASICの入力インピーダンスを示した。特性比較のため、同図には入力信号、高速電荷増幅部及び波形整形増幅部の周波数特性も合わせて示した。ASICの入力インピーダンスは入力信号の周波数が100kHz以下の低周波帯域では362 Ω であり、それ以上の周波数では徐々に低下して、3.2MHzで最低の165 Ω となる。この入力インピーダンスの特性は高速電荷増幅部の周波数特性に依存するもので、図中の両特性が同様の傾向を示していることからわかる。波形整形増幅部の周波数帯域における入力インピーダンスは230 Ω から350 Ω である。

Fig.15は高速電荷増幅部の入力パルス波高に対する出力直線性を調べた結果である。図の特性から高速電荷増幅部は、入力パルス波高が-10 μ Aから10 μ Aの範囲で出力が390mVから-390mVで極めて良い直線性を有していることを示している。

3.2 波形整形増幅器部及びベースライン補正部

Fig.16及びFig.17は波形整形増幅部の出力パルス波形の計算結果である。波形整形増幅部では時定数50nsの微分1段及び積分3段から構成した擬似ガウシアン整形を行っている結果、その出力波形はバイポーラパルスとなっている。高速電荷増幅部を含めた波形整形増幅部の出力におけるゲインは51k Ω 相当である。また、入力パルスの極性が変わっても出力が反転するのみで全く変わらないことを示している。

Fig.18及びFig.19はベースライン補正部の出力波形である。ベースライン補正部では、高速電流スイッチングを用いたベースラインの補正を行うとともに、LVDSのHigh出力とLow出力

のパルスを供給するため、差動増幅器を用いて正負両極性パルスを出力している。ベースラインの補正速度は $31.7 \text{ mV}/\mu\text{s}$ である。高速電荷増幅部及び波形整形増幅部を含めたベースラインの補正部出力のゲインは $150 \text{ k}\Omega$ 相当である。ASICの入力パルスの極性が変わるとベースラインの補正部出力の極性が反転するため、LVDS出力端子の High 出力と Low 出力も入れ替わる。

Fig.20 にベースラインの補正部出力における入出力直線性を示す。両出力とも入力パルス波高にして $\pm 5.2 \mu\text{A}$ 、出力波高で $\pm 800 \text{ mV}$ の範囲で極めて良い直線性が得られている。MPGCの出力波高は最も大きなパルスでも $2 \mu\text{A}$ 程度であるので十分な直線性範囲である。

3.3 波高弁別部及びLVDS出力

波高弁別部はディスクリ設定部とコンパレータから構成される。Fig.21 及び Fig.22 にディスクリ設定部の出力波形を示す。この時のディスクリ設定値は 100 mV 及び -100 mV とした。入力信号パルスが正極性パルスでディスクリ設定値 100 mV に設定した時、Lower 側(Fig.4 回路図に示す⑦L側)が 455.5 mV に Upper 側(Fig.4 回路図に示す⑦U側)が 398.4 mV にそれぞれシフトされる。この電圧差の約 $1/2$ がディスクリ設定電圧となる。また、入力信号パルスが負極性パルスでディスクリ設定値が -100 mV の時は Lower 側と Upper 側が入れ替わりのみで、全く同じ動作をする。

Fig.23 及び Fig.24 はコンパレータ出力波形である。この時のディスクリ設定値はそれぞれ $\pm 145 \text{ mV}$ である。Fig.23 の図で、入力波高が $0.25 \mu\text{A}$ の時の出力波形は、コンパレータが完全に ON、OFF していない結果、波高が Lower 側及び Upper 側とも中間の波高で留まっているのがわかる。これ以下の入力パルスは波高弁別部から出力されない。また、 $0.25 \mu\text{A}$ 以上の入力波高ではコンパレータが完全に切り替わり Lower 側と Upper 側が反転した出力パルスが得られている。Fig.24 に示した入力パルスが負極性の場合には、正極性と比べて増幅器のゲインが若干低い結果、 $-0.25 \mu\text{A}$ の時の出力波形は更に小さくなっている。

Fig.25 及び Fig.26 はディスクリ設定値がそれぞれ $\pm 145 \text{ mV}$ の時の LVDS ドライバーの出力波形である。Fig.25 に示す正極性パルス入力の場合には、入力波高が $0.25 \mu\text{A}$ の時の出力波形は中間波高となっているが、それ以上の入力波高では完全な矩形パルス出力となっている。LVDS ドライバーから出力される矩形パルスの最大幅は、 192 ns である。Fig.26 に示す負極性パルス入力の場合には、LVDS ドライバー出力端子の Upper 側(⑩U)と Lower 側(⑩L)の極性が変わる。このため、LVDS レシーバーの回路では、極性切り替わりに対応した設計が必要である。Fig.26 に示す入力波高が $-0.25 \mu\text{A}$ の時は、ゲインが若干小さく波高が小さい結果、出力されないがそれ以上では完全な矩形パルス出力となる。上記に述べた入力波高が $\pm 0.25 \mu\text{A}$ における正極性と負極性の場合の微小な相違は、ディスクリ設定値で調整可能であるから実用上全く問題とはならない。

Fig.27 はディスクリ設定電圧と入力パルス波高の関係を示したグラフである。ASIC外部から設定されるディスクリ電圧は $\pm 800 \text{ mV}$ である。入力パルスの極性が正の時、ディスクリ電圧はプラス電圧で、入力パルスの極性が負の時にはディスクリ電圧もマイナス電圧に設定する必

要がある。Fig.27 の図で、入力パルスの極性が正負の時の特性が完全に一致していないのは、先に述べたように増幅器のゲインが若干異なっているためである。ディスクリ電圧が最大の800 mVで弁別される入力パルス波高は $1.3 \mu\text{A}$ (51 fC相当)であり、-800 mVの時のそれは $-1.36 \mu\text{A}$ (53 fC相当)である。

3.4 アナログ出力

Fig.28 及び Fig.29 はASICのアナログ出力波形である。入力パルスが正極性の時にアナログ出力は反転して負極性パルスで出力され、入力パルスが負極性の時に正極性パルスで出力される。アナログ出力は波形増幅部の出力から取っている結果、バイポーラパルス波形である。また、ASICのアナログ出力端子はオープンエミッタ出力としているため、受信端では2 k Ω を介して-3VのDC電源に接続することを推奨する。

Fig.30 にアナログ出力の入出力直線性を示す。増幅器ゲインが正極性と負極性の場合で若干異なっているが、差が小さい結果、アナログ出力は入力パルス波高が $\pm 5.5 \mu\text{A}$ 、出力パルス波高で793 mVから-855 mVの範囲で十分な直線性を有していることを示している。入力パルスが正負極性のときのそれぞれのゲインは、153 k Ω 及び147 k Ω 相当である。

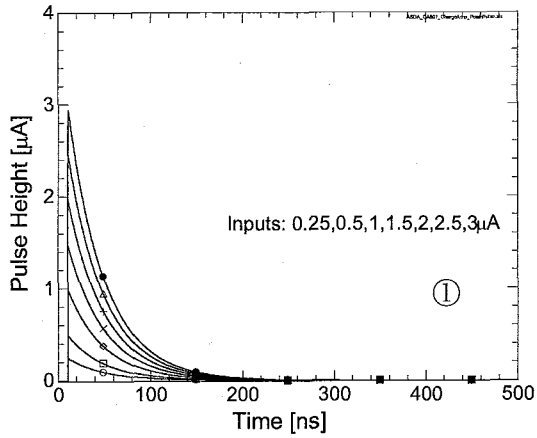


Fig.10. Input pulse shapes with positive polarity for simulation of the ASIC.

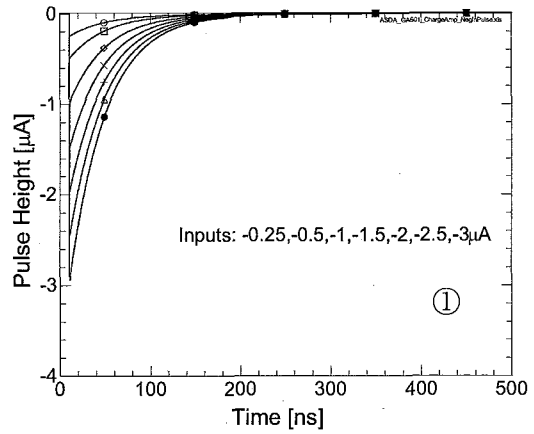


Fig.11. Input pulse shapes with negative polarity for simulation of the ASIC.

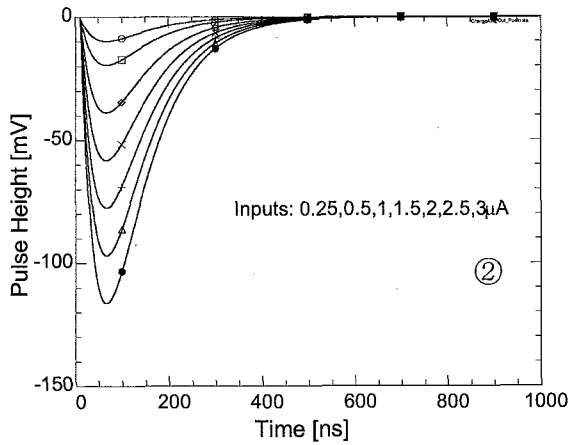


Fig.12. Pulse shapes at outlet of the charge amplifier, input pulse condition: positive.

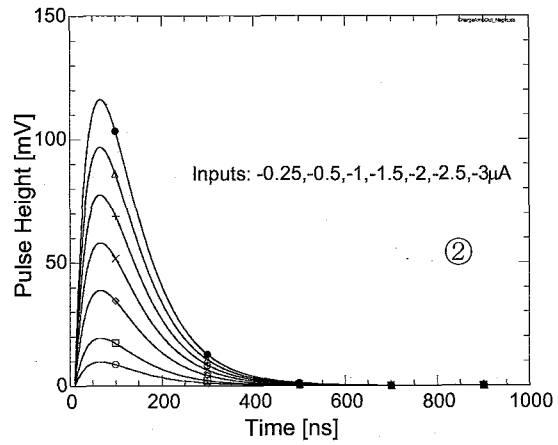


Fig.13. Pulse shapes at outlet of the charge amplifier, input pulse condition: negative.

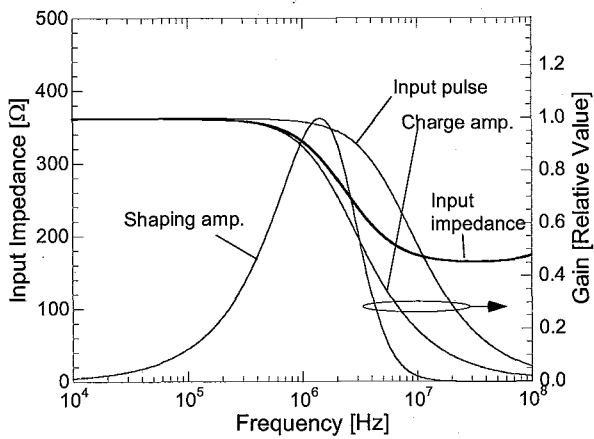


Fig.14. Input impedance of the charge amplifier depended on frequency. Frequency characteristics of input pulse, charge amplifier and shaping amplifier.

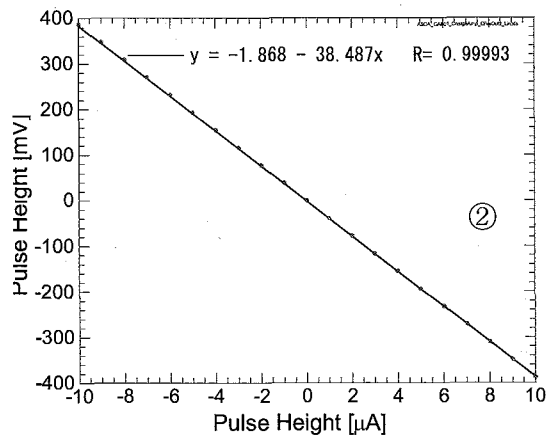


Fig.15. Output linearity of the charge amplifier.

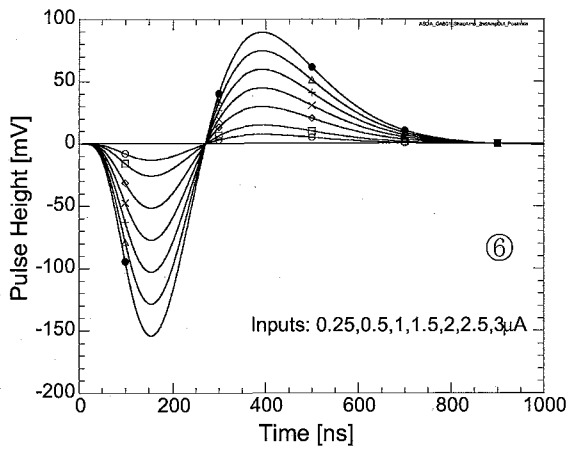


Fig.16. Pulse shapes at outlet of the shaping amplifier, input pulse condition: positive.

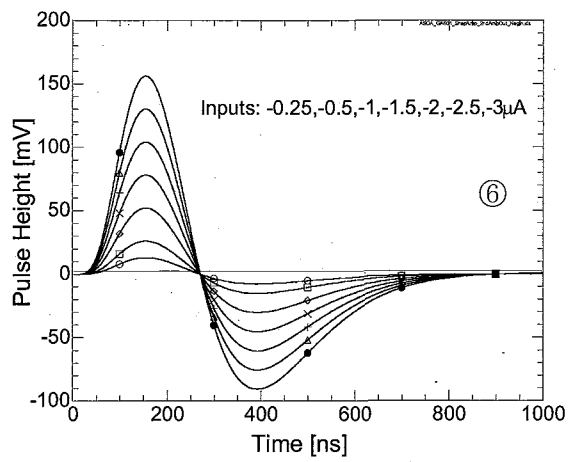


Fig.17. Pulse shapes at outlet of the shaping amplifier, input pulse condition: negative.

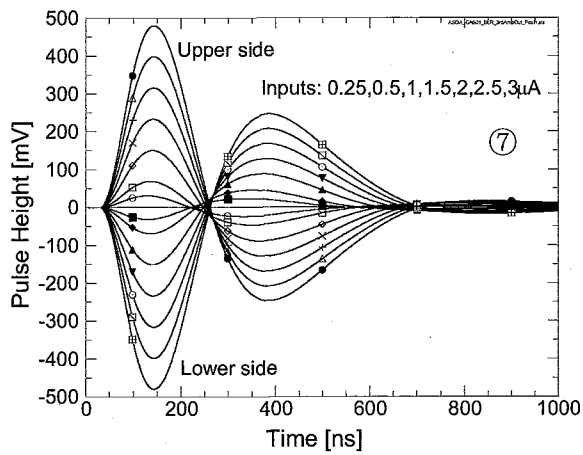


Fig.18. Pulse shapes at outlet of the BLR amplifier, input pulse condition: positive.

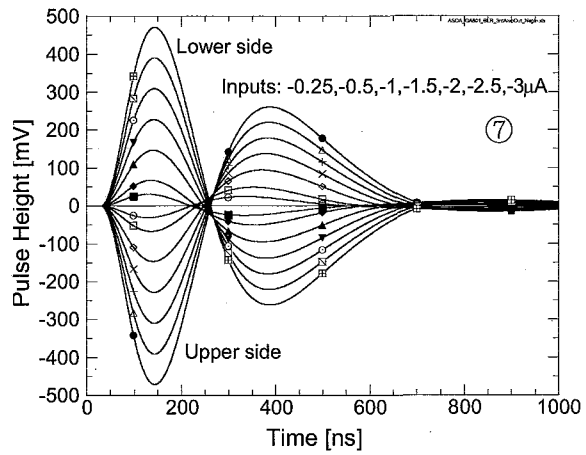


Fig.19. Pulse shapes at outlet of the BLR amplifier, input pulse condition: negative.

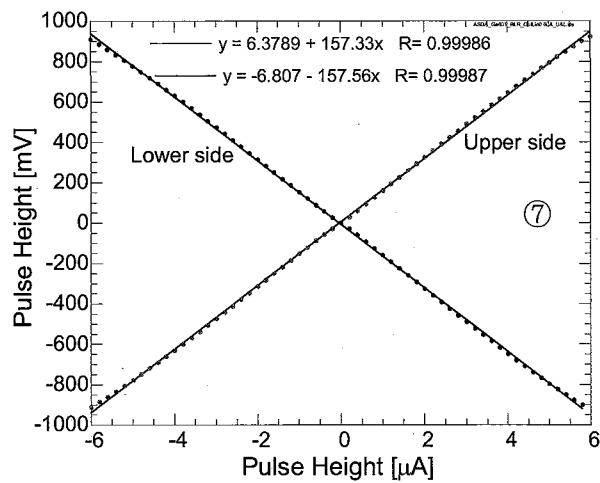


Fig.20. Output linearity of the BLR amplifier.

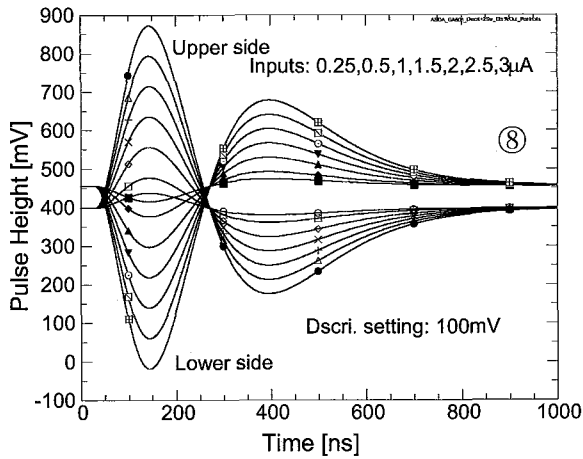


Fig.21. Pulse shapes at outlet of the threshold voltage setting stage, input pulse condition: positive.

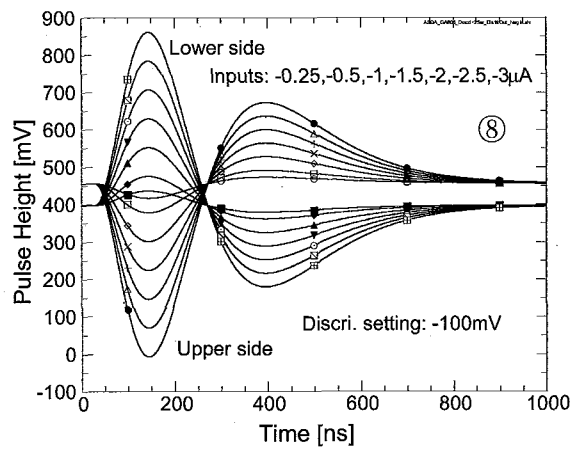


Fig.22. Pulse shapes at outlet of the threshold voltage setting stage, input pulse condition: negative.

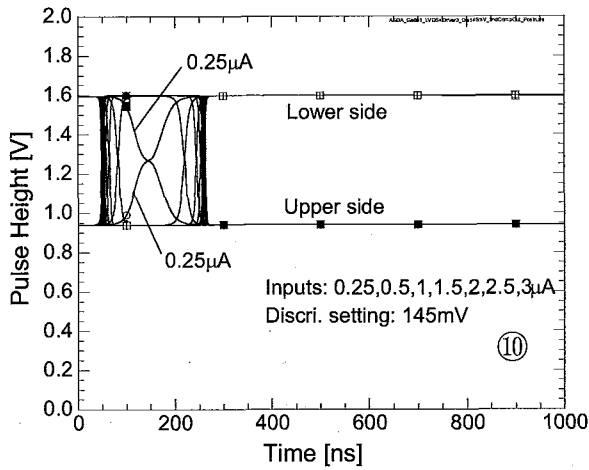


Fig.23. Pulse shapes at outlet of the comparator, input pulse condition: positive.

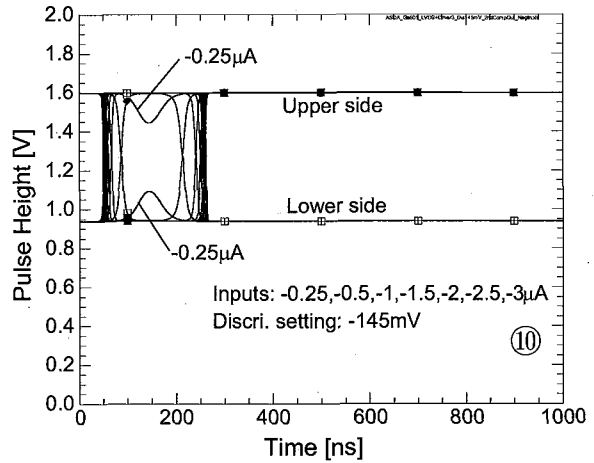


Fig.24. Pulse shapes at outlet of the comparator, input pulse condition: negative.

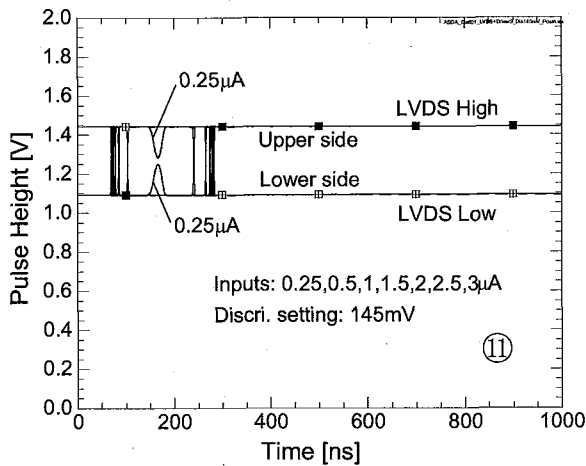


Fig.25. Pulse shapes at outlet of the LVDS driver, input pulse condition: positive.

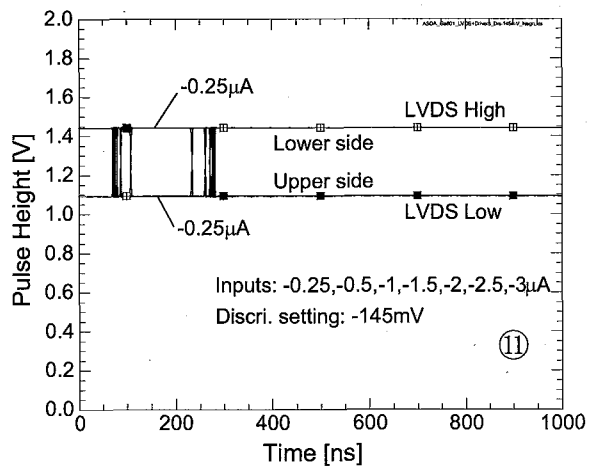


Fig.26. Pulse shapes at outlet of the LVDS driver, input pulse condition: negative.

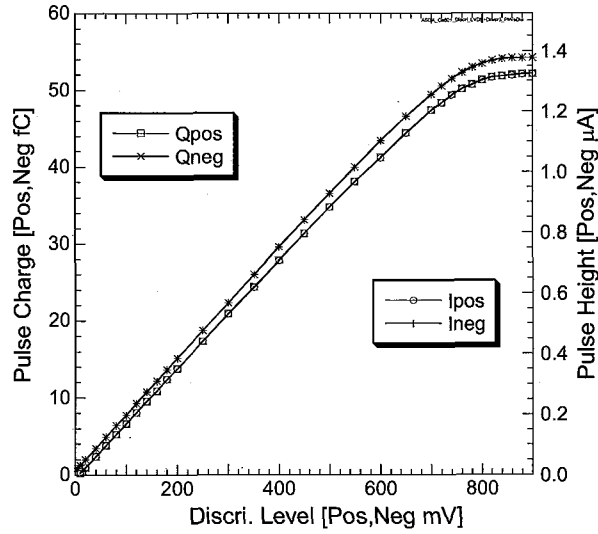


Fig.27. Characteristics of the discrimination voltage versus input pulse height.

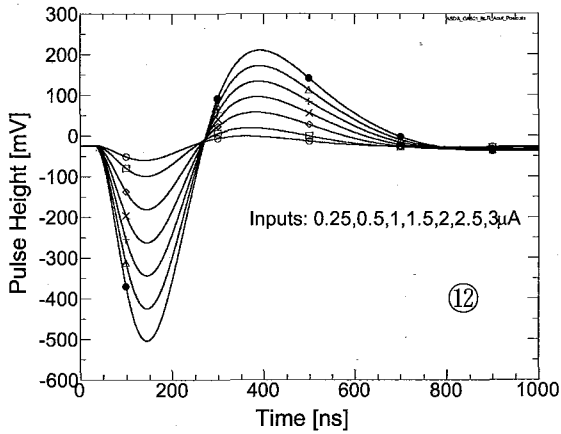


Fig.28. Pulse shapes at outlet of the analog port, input pulse condition: positive.

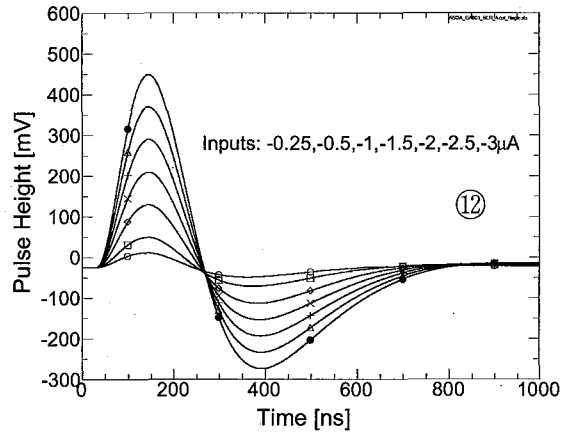


Fig.29. Pulse shapes at outlet of the analog port, input pulse condition: negative.

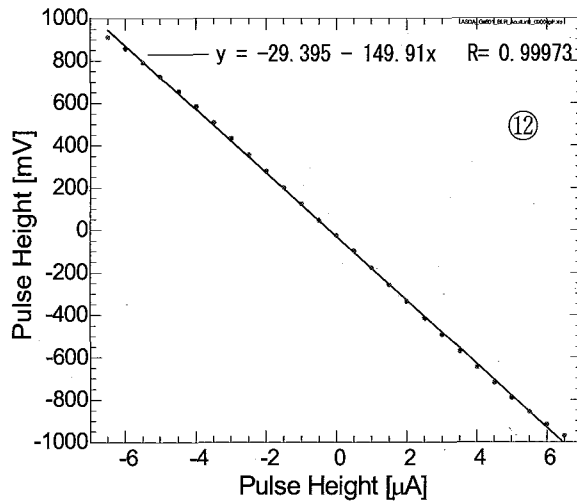


Fig.30. Output linearity of the analog port.

4. 結 論

高速二次元中性子ガス検出器 (MPGC) 素子から出力される中性子パルス信号は波高値が $0.5 \mu\text{A}$ で半値幅が 30 ns 程度の高速且つ微小の電流パルスである。また、我々が開発を目指しているMPGCシステムは $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 前後の高い位置検出分解能を有し、且つ 10^6 cps 相当の高計数率にも対応した検出器システムである。このため、MPGC素子から出力される信号を個別に読み出す方式を採用している。この結果、有感面積 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の実用レベルの検出器システムでは 500 チャンネル以上の高速微小信号を平行にリアルタイムで増幅、デジタル化処理する必要がある。上記のことからMPGCシステムを開発するには高速、高ゲイン及び高いS/Nを有したASICの開発が不可欠である。今回、MPGCシステム用に最適設計したASICを設計し、その性能をシミュレーションにより評価した。

設計したASICの主な仕様を Table 1 に示す。高速電荷増幅部のゲインは 1.86 V/pC で、入力インピーダンスが 300Ω 、積分時定数が 80 ns である。波形整形増幅部は微分1段と積分3段より構成した擬似ガウシアン整形とし、時定数を 50 ns とした。アナログ出力はバイポーラでゲインは $150 \text{ k}\Omega$ 相当である。デジタル出力はLVDS規格に適合した 3.5 mA 電流出力で、High 出力が 1.44 V 、Low 出力が 1.09 V である。

シミュレーションによる性能評価の結果、これまで代用してきたガンマ線検出器用に開発されたASICと比較して、ゲインが2倍以上でS/Nが5倍以上改善されることがわかった。

Table 1. Specification of the ASIC.

Preamplifier Maximum input pulse height: gain: Time constant of integration: Input impedance: Maximum output:	$\pm 10 \mu\text{A}$ 1.86 V/pC 80 ns $300 \text{ k}\Omega$ $\pm 400 \text{ mV}$
Shaping amplifier Quasi-gaussian shaping: Shaping time constants:	Differential x 1, Integral x 3 50 ns (Differ. and Inte.)
Analog output Open Emitter: Maximum output:	$2 \text{ k}\Omega$ load to -3 Vdc $\pm 800 \text{ mV}$
Discriminator Threshold voltage: Maximum discriminating pulse height:	$\pm 800 \text{ mV}$ $\pm 1.3 \mu\text{A}$
Digital output LVDS:	100Ω load, 3.5 mA
Power supply DC power:	$\pm 3 \text{ V}$

謝 辞

ASICの設計に関してご指導、ご助言いただいた日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・主任研究員の坂佐井馨氏、産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員の板谷太郎氏及び高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授の佐々木修氏に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

1. O.Sasaki and M.Yoshida; "ASD IC for the Thin Gap Chambers in LHC Atlas Experiment", IEEE trans. Nucl. Sci. 46(1999).
2. 谷森達、窪秀利、"SONY ASD-IC CXA3653Q 仕様書"、<http://www-cr.scphys.kyoto.u.ac.jp/orito/asd/CXA3653Q.pdf>.

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光の強度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強度 (物質量の濃度)	アンペア毎メートル	A/m
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
	名称	記号		
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ⁰ ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ⁰ ・kg ¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光の強度	ルーメン	lm	cd・sr ^(e)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射線種の)放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30) × 10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		SI 基本単位による表し方
	名称	記号	
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ¹ ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ⁰ ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ⁰ ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ¹ ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎メートル毎ケルビン	J/(m・K)	m ⁰ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
電界の強度	ボルト毎メートル	V/m	m ⁰ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ⁰ ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
吸収線量	グレイ	Gy	m ² ・s ⁻²
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =kg ¹ ・s ⁻³

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002 × 10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat=200 mg=2 × 10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m