# (14) 16 チャンネル CMOS プリアンプ ASIC の特性

# 東京大学人工物工学研究センター 高橋浩之

東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 Yeom Jung Yeol, 中沢正治

#### 1. はじめに

これまでに東京大学 VDEC の ROHM の 0.35um CMOS プロセスを利用して、種々の ASIC(Application Specific Integrated Circuit)の試作を行ってきたが、ここでは、PMT より低ゲインで高速性の要求され る APD(Avalanche Photo Diode)や化合物半導体検出器等の利用を念頭に置いて開発した、高速・低雑音の 16 チャンネル CMOS プリアンプの特性について報告する。

### 2 . CMOS-ASIC によるプリアンプ

CMOS ASIC は、高速かつ低消費電力で集積度を高くすることができ、アナログ回路からディジタル回路 まで目的に応じた任意のものが製作可能であるなど、PET において必要とされるフロントエンドエレクト ロニクスに適している。しかし、一般には、接合型 FET に比べて MOSFET は 1/f 雑音が大きいことが知ら れており、CMOS プロセスを用いた ASIC は、特にプリアンプの初段を構成する上では不利であるといえる。 もちろん、これまでの PET においては PMT(PhotoMultiplier Tube)など増幅度の高いデバイスが用いられ てきたので、プリアンプなどの増幅器の雑音は、大して問題にはならなかった。しかし、小型で稠密に 配列することの可能な APD[1-2]や化合物半導体などの利用を考えると、これらの検出デバイスは増幅度 が低いかあるいは増幅度をもたないため、高速かつ低雑音のプリアンプ ASIC が必須となってくる。一方、 ASIC では回路素子をチップ上に最短距離で自由にレイアウトすることができ、また MOSFET の特性も任意 のものが実現できる。このため、ディスクリート素子を用いたプリアンプと比較して、素子選択やレイ アウト上の自由度は大きい。したがって、レイアウトまで含めた回路の最適化により高い性能を実現す ることも可能であると考えられる。最近の CMOS プロセスにおける、もう一つの問題としては、電源電圧 の低電圧化が進んでいるということがあげられる。これは、ダイナミックレンジを確保し、高性能なア ナログ回路を実現する上では厳しい制約条件となり、回路構成を工夫する必要がある。目標性能として は、立ち上がり時間 10ns 程度、等価雑音電荷(ENC:Equivalent Noise Charge)10<sup>-16</sup>クーロン程度の性能を、 PET におけるフロントエンド回路については実現する必要がある。そこで、立ち上がり時間 10 ns、等価 雑音電荷 0.16fC 以下の性能を目標として ASIC による高性能プリアンプ回路の設計と試作、ならびに性能 評価を行った[3-5]。

# 3.プリアンプ ASIC の構成

前述のような制約条件の下で高いプリアンプ性能を実現するためには、初段のトランジスタの増幅度 を高くとる必要があり、高いW/L値をもつトランジスタを用いた。また高速かつ低動作電圧の増幅器を実 現する必要があるので、回路構成は、ブーステッドカスコード増幅器とした。プリアンプの積分時定数 は可変として、種々の動作条件に対応ができるようにした。



図1 プリアンプの回路構成

プリアンプ部のみを検出器付近に設置すれば、柔軟なシステム構成が可能になるので、今回は図2に示す ような電荷増幅器を16チャンネル集積し、2.4mm角のチップを製作することとした。



図2 試作した 16 チャンネルプリアンプチップの写真

このように高速かつ低雑音な増幅器は、PET のみならず、広い用途に利用可能であるという利点があるので、汎用のプリアンプチップとしての実用化も視野に入れた。実際に設計・製作したプリアンプのレイアウトを図3に示す。

4.プリアンプ ASIC の特性試験

試作した 16 チャンネルプリアンプチップのセラミックパッケージ版について、実際の検出器などと組

み合わせた動作試験を行った。まず、プリアンプ ASIC 単体での立ち上がり時間は、パルサーを用いて試 験した結果 15nsec となった。プリアンプの直線性は、比較的良好で、両極性の信号に対して、ダイナミ ックレンジは、-500fC~1800fCの範囲で直線性を保つ。 雑音特性は、ENC(Equivalent Noise Charge)を用 いて評価した。ENC は、ASIC に接続する検出器の静電容量、ならびに波形整形時定数に応じて変化するが、 検出器容量が0の場合に 0.14fC(FWHM)の低雑音特性が得られている。実際の動作条件においては、適当 なサイズの APD や化合物半導体検出器を接続するため、数 10pF 程度の検出器容量が入力に入るので、 0.2-0.4fC(FWHM)程度の等価雑音電荷となる。しかし、511keVのガンマ線を検出した際の信号の大きさは、 シンチレータの効率やAPDのゲインによって異なるが、10fCのオーダーになるので、信号対雑音比ではエ ネルギー分解能における雑音の寄与を数%に抑えることができる。シンチレーション検出器のエネルギー 分解能は通常 10%以上であるので、APD とシンチレータの組み合わせにおいては、本チップを用いること によるエネルギー分解能の劣化は小さいものと考えられる。ただし化合物半導体検出器では、適切な信 号処理法と組み合わせることでエネルギー分解能は 2%以下まで得られるので、CMOS プリアンプの雑音成 分のエネルギー分解能への寄与は支配的要因となる。図3に浜松ホトニクス製の APD (S8644-55)と GS0 シンチレータを組み合わせ、本 ASIC により読み出した場合に得られた 511keV のガンマ線のエネルギー分 解能と印加電圧の関係を示す。印加電圧 360V ( APD の増幅度~60 )のときにエネルギー分解能の最高値が 得られており、その値は約 11.3%となった。図 4 に最高のエネルギー分解能が得られた条件において、 Na-22 線源の照射により得られたエネルギースペクトルを示す。





図 3 APD の印加電圧と 511keV 線のエネルギー分解能の関係

図 4 APD の増幅度約 60 のときに Na-22 線源の照射により得られたエネルギースペクトル



図 5 80 ピンのセラミックパッケージチップを用いたテスト基板



図6 同時計数イベントの時間スペクトル

図5には、テスト基板を用いて APD と GSO シンチレータの組み合わせでテストをしている様子を示す。2 系統の APD と GSO シンチレータの組み合わせに Na-22 線源から得られるポジトロンの消滅 線を用いて測 定を行った。511keV の信号に対して、タイミング測定回路として時間波高変換器(TAC)を用いてタイミン グ測定を行った結果得られた時間スペクトルを図6に示す。これより、同時計数信号に対する時間分解能 は 12.5ns(FWHM)の値が得られた。時間分解能としては、まだ改善の余地があると思われるが、プリアン プの問題か、APD の問題か、またはチップ実装時の問題かについて検討を行っているところである。なお、 実際に本チップを利用して長期間にわたる測定を行ってみると、少しづつ不良チャンネルができること が分かった。これは、宇宙線入射などにより、高電圧動作中の APD からの出力信号が極端に大きくなった 場合に、CMOS の入力段を破壊してしまうことが原因であると考えられる。このため、高速のダイオード を用いたサージアプソーバによる入力保護回路を入力段に外付けすることにした。この改良により、現 在は、プリアンプのチャンネルの破損はなくなり、安定に動作するようになった。図7に本チップをベア チップとして3個搭載したボード(100m×40mm)を示す。このボード1枚に48チャンネルの高速・低雑音 プリアンプを集積しており、積分時定数も外部電圧により制御可能である。



図7 48 チャンネルプリアンプボード

# 5.まとめ

CMOS ASIC を用いた 16 チャンネルのプリアンプについて、試作と特性測定を行った。この結果、立ち上が り時間は、15nsec、等価雑音電荷は、0.14fC(FWHM)の性能が得られた。GSO シンチレータと APD の組み 合わせについて1ペアの検出器により得られる時間分解能を測定した結果、12.5ns(FWHM)の時間分解能が 得られた。また、このベアチップを3個載せたボードを製作し、動作を確認した。今後、本ボードを多数 製作して APD や CdTe 検出器と組み合わせ、高分解能 PET のプロトタイプの特性評価を行う予定である。

#### 参考文献

[1] APD arrays and large-area APDs via a new planar process, R. Farrell, K. Shah et al., Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res., A 422 (2000) 171-178.

[2] Design studies of a high resolution PET detector using APD arrays, Y. Shao, R. W. Silverman, R. Farrell, L. Cirignano, R. Grazioso, K. S. Shah, G. Visser, M. Clajus, T. O. Tumer, S. R. Cherry, IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 47, No. 3 (2000) 1051-1057.

[3] JY. Yeom, H. Takahashi, T. Ishitsu, M. Nakazawa, H. Murayama, Development of a high resolution APD based animal PET and multi-channel waveform-sampling front-end ASIC, The Second iTRS International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology ISORD-2, Sendai, July 24-25 (2003).

[4] A new M-MSGC readout method and front-end ASIC development, P. Siritiprussamee, H. Takahashi, J. Y. Yeom, T. Ishitsu, et al., Nucl. Instr. and Meth. A525 (2004) 225-228.

[5] Development of a multi-channel Waveform Sampling ASIC for Animal PET with DOI Information, J.Y. Yeom,

H. Takahashi, T. Ishitsu, M. Nakazawa, H. Murayama, Nucl. Instr. and Meth.A525, (2004) 211-214.