

高計数率 X 線計測のための検出器エレクトロニクスの高速化

原田雅章, 桜井健次

(1996年8月7日受理)

Fast Main Amplifiers Modified for High-Counting-Rate X-Ray Measurements

(Received 7 August, 1996)

Masaaki HARADA and Kenji SAKURAI

National Research Institute for Metals

1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Fast detector electronics is required for high-counting-rate X-ray measurements. Since the time needed for pulse shaping by a NIM-standard amplifier often limits the total speed of the detector electronics, amplifiers commercially available have been modified so that they can shape a narrower pulse. In the present paper, both spectroscopy and delay-line amplifiers are described. It has been demonstrated that the modified delay-line amplifier can shape an extremely narrow pulse (FWHM=0.12 μ s). When combined with a detector equipped with a fast-acting scintillator $YAlO_3 : Ce$, very short dead time of 0.26 μ s was obtained, which means 21% counting loss for 10^6 cps X-rays. Such performances are promising for the application to high-counting-rate X-ray measurements, such as X-ray diffraction and XAFS.

[Key words] High-counting-rate X-ray detectors, Detector electronics, Pulse shaping, Spectroscopy amplifier, Delay-line amplifier, Proportional counter, Scintillation detector, Dead time, Counting loss, $YAlO_3 : Ce$

(Advances in X-ray Chemical Analysis Japan **28**, P.277~288)

強い X 線をカウンティングするためには、高速な検出器エレクトロニクスが必要であるが、アンプでのパルス成形に要する時間（出力パルスの時間幅に対応）が検出器エレクトロニクスの律速となっていた。そこで、アンプの回路変更により幅の狭いパルスを成形可能な高速アンプを開発した。NIM規格の二種類のアンプ、スペクトロスコープアンプとディレイラインアンプに回

路変更を施した結果、いずれの場合もより幅の狭いパルス出力が得られ、アンプのパルス成形の高速化が実現できた。特に、改造ディレイラインアンプは出力パルスの半値幅が $0.12\ \mu\text{s}$ と、極めて高速なパルス成形が可能である。この改造ディレイラインアンプを高速な応答が得られることで知られているシンチレータ $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ (YAP:Ce)の信号処理に採用したところ、検出システム全体の不感時間は $0.26\ \mu\text{s}$ と極めて短く、 10^6cps のX線を約20%の数え落としで計数可能な高速検出器システムを実現できることが明らかになった。本研究で開発した高速な検出器エレクトロニクスは、今後回折、XAFSなどのX線領域の高計数率測定への応用が期待される。

[キーワード] 高計数率X線検出器, 検出器エレクトロニクス, パルス成形, スペクトロスコーピーアンプ, ディレイラインアンプ, 比例計数管, シンチレーション検出器, 不感時間, 数え落とし, $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ 結晶

1. はじめに

強力X線源を用いるX線回折、XAFSなどの実験¹⁾においては、強いX線を少ない数え落としとして計数する必要がある。そのためには、高速な応答が得られる検出素子の採用に加え、高速な信号処理が重要である。従来の検出器エレクトロニクス(NIMの標準モジュール)では μs オーダーの不感時間があり、高計数率($10^5\sim 10^7\text{cps}$)の測定が困難なため、より高速な検出器エレクトロニクスの開発が課題となっていた。検出器エレクトロニクスはプリアンプ、メインアンプ、ディスクリミネーター、カウンター等から構成されるが、特にメインアンプにおける処理時間が検出器エレクトロニクス全体の速度を制約している場合が多い。そこで本研究では、メインアンプの高速化についての検討を行った。

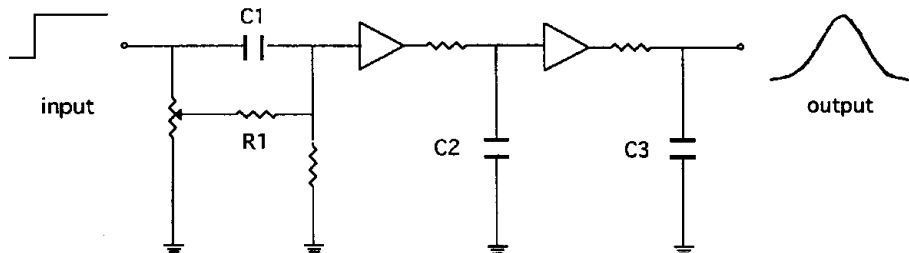
メインアンプはプリアンプからのステップ状の入力信号を増幅してパルスとして出力するが、パルス成形に要する時間内は次の入力信号を処理することができない(アンプの不感時間)。アンプの出力パルスの時間幅がこの不感時間に対応するので、原理的には短い幅のパルスを成形できるようにすれば、アンプの高速化は可能である。

そこで、代表的なアンプ2種類、スペクトロスコーピーアンプとディレイラインアンプについてその回路変更による高速化を試みた。改造したアンプをガスフロー比例計数管と組み合わせ評価した。更に、ディレイラインアンプに関してはシンチレーション検出器と組み合わせ評価も行った。これらの改造内容と評価結果について報告する。

2. アンプの改造

2.1 スペクトロスコピーアンプの改造

スペクトロスコピーアンプでは抵抗 (R) とコンデンサー (C) の組み合わせによる微分、積分回路によりステップ状の入力パルスをガウス型のパルス波形に成形する。改造に用いたスペクトロスコピーアンプは応用光研工業(株)製リニアアンプ704-4型で、基本的にはCRによる1回の微分回路と2回のRCによる積分回路から成っている。この場合の出力パルス幅は時定数の3倍程度となる。標準品は1.6, 0.8, 0.4 μs の3通りの時定数が使用可能であるが、RとCの値を変更することによりパルス幅を変えることができる。時定数0.1 μs 程度まではRとCの変更により実現可能と考えられるので²⁾、Fig. 1に示すような回路変更を行った。



Shaping time (μs)	C1 (pF)	R1 (k Ω)	C2,C3 (pF)
1.6	1600	15.8	6400
0.8	800	31.6	3200
0.4	400	61.9	1600
0.1	100	250	400

Fig. 1 Circuit changes of the spectroscopy amplifier that were required for this modification.

2.2 ディレイラインアンプの改造³⁾

ディレイラインアンプでは、入力パルスからある一定時間 (τ :ディレイタイム) だけ遅れたパルスを作り、これと元のパルスとの間で引き算をすることによりパルス成形する。出力パルス幅は後段の積分回路により多少広がるが、基本的にはディレイタイムにより決まると考えてよい。

改造に用いたディレイラインアンプはEG & G ORTEC社製460型で、市販品は1 μs のディレイライン (オプション品で0.25 μs) が使用されているが、ディレイタイムが0.1 μs

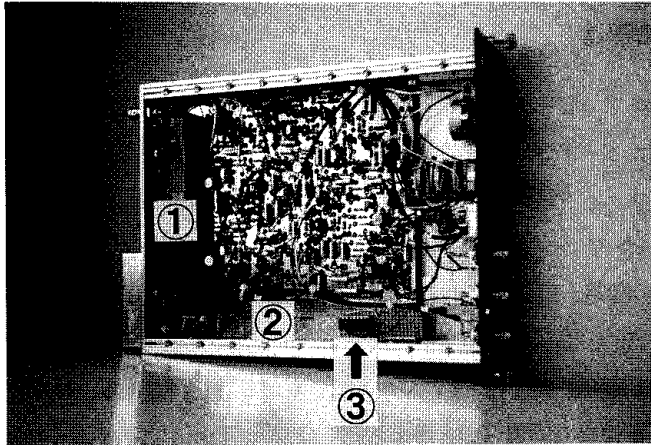


Photo. 1 Electric circuit of the modified delay - line amplifier.

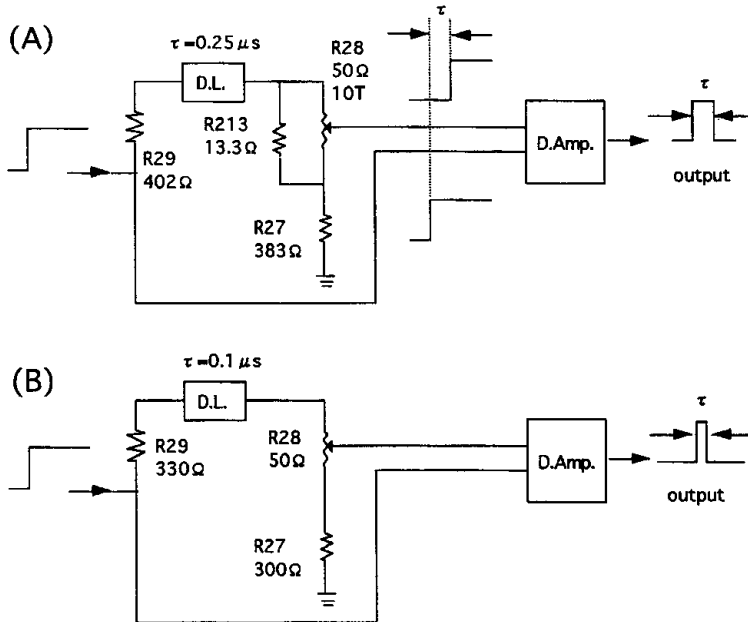


Fig. 2 Circuit changes of the delay - line amplifier that were required for this modification; before (A) and after (B) modification. The notations "D.L." and "D.Amp.," represent delay line and differential amplifier, respectively.

のものに交換した。市販品に用いられているディレイライン (Photo. 1の①) はアルミの箱でシールドされた比較的大きい部品である (20mm × 140mm)。今回採用した0.1 μsのディレイライン (昭和電線電纜(株)製Z35-100) は小型 (10mm × 20mm) で安価なチップタイプの部品である。Photo 1の②にあったオリジナルのディレイラインを外して空いたスペースに取り付けた (Photo 1の③)。取り付けに際しては、可能な限り配線を短くし、アルミフォ

イルでシールドするなどのノイズ対策を施した。その結果、取り付けたディレイラインは良好な性能を示し、特に問題点は認められなかった。ただ、今回使用したディレイラインチップは中間のタップを使用することにより様々なディレイタイムが使用出来るようになっているが、中間タップの使用はインピーダンスの不整合のために正常なパルス波形が得られなかった。そこで、終端で100nsのディレイタイムを持つチップを使用し、その終端を350Ωでターミネートした。その他の周辺の回路変更についてはFig. 2にまとめて示した。

3. 改造結果の評価方法

アンプの改造結果の評価は、アンプからの出力パルス幅の直接観察、および検出器システム全体としての不感時間の測定の2点について行った。

3.1 評価装置

評価に用いた測定装置をFig. 3に示す。回転対陰極型X線発生装置からのX線を結晶分光器で単色化して検出器に入射した。アンプからの出力波形をオシロスコープ（Tektronix

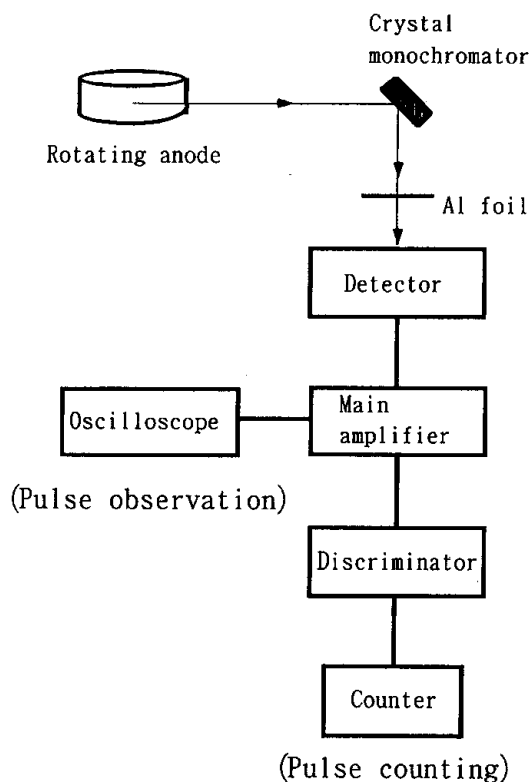


Fig. 3 Schematic of the dead time measurement system.

TAS250, 50MHz) 上で直接観察しながら、ディスクリミネータとカウンターにより計数率の測定を行った。装置の詳細については、ガスフロー比例計数管の場合とシンチレーション検出器の場合とで異なるので、以下個別に説明する。

(1) ガスフロー比例計数管の場合

Mo回転対陰極型X線源(運転条件: 17.5kV, 700mA)からのX線をGe(220)で単色化して9keVのX線を使用した。検出器にはガスフロー比例計数管(管内径: 20mm, 芯線: 金メッキタングステンワイヤー20 μ m径, 使用ガス: PRガス, 印加電圧: +1250V, プリアンプ: 電荷敏感型PA-5PC(サンシン電機(株)製))を使用し, シングルチャンネルアナライザ(ORTEC SCA, 550)とカウンター(NAIG Dual Counter/Timer, E-541)により計数率の測定を行った。入射X線強度の変更は光路に挿入するアルミフォイル(30 μ m厚)の枚数を加減することにより行った。

(2) シンチレーション検出器の場合

Cu回転対陰極型X線源(運転条件: 30kV)からのX線をLiF(200)で単色化して8keV(CuK α 線)のX線を使用した。検出器には応用光研工業(株)社製シンチレーションプローブ(SP-10)にシンチレータを装着して使用した。シンチレータとしては, YAlO₃:Ce(YAP:Ce)^{4)~6)}と, 比較のために従来から最も広く用いられているNaI(Tl)(発光寿命~230ns)を使用した。YAP:CeはNaI(Tl)に比べてエネルギー分解能は劣るものの, 発光寿命が約一桁も短く(~25ns)高速な応答が得られることから近年注目を集めているシンチレータである。プリアンプはNaI(Tl)検出器用として一般的な100 μ Fのコンデンサーを内蔵した電圧型のものを用いた。後段のエレクトロニクスとしては, 0.25 μ sディレイラインアンプ(ORTEC, 460)とシングルチャンネルアナライザ(ORTEC SCA, 550)の組み合わせ(Conventional)と, 0.1 μ sディレイラインアンプ(高速化改造アンプ)とファーストディスクリミネータ(OKEN, 805-1)の組み合わせ(Modified), の2通りの組み合わせを用いて比較した。カウンターにはORTEC, 974を使用した。入射X線強度は, 管電圧は固定して管電流の値を変えることにより変化させた。

3.2 不感時間の測定法

不感時間の測定法は基本的に深町の方法⁷⁾に同じであり, 実質的にはシングルフォイル法^{8)~10)}である。アブゾーバ(アルミフォイル90 μ m厚)透過前後で実測されるX線強度(cps)をそれぞれ I_0 , I とすると, これらの間には近似的に次の関係が成立する。

$$I_0/I = -R\tau(I_0 - I) + R \quad (1)$$

ここで, R は I_0 と I の真の強度の比(入射/透過), τ (s)が不感時間である。よって, 様々なX線強度に対して I_0 と I を測定し, $(I_0 - I)$ に対して (I_0/I) をプロットすれば, 直線回帰

により不感時間 τ が求められる。なお、今回の測定では $R=2.32$ (計算値)である。また、測定したのは厳密には分解時間であるが、ここでは不感時間と読み替えることにする。

4. 結果と考察

4.1 ガスフロー比例計数管の結果

スペクトロスコピーアンプ改造前後での信号波形変化をFig. 4に示す。改造後のアンプでは得られる波高に多少の低下が見られたが、アンプゲインの調整範囲内であり問題はなかった。そこで波形観察はどちらも波高が約2Vになるようにアンプのゲインを設定して行った。信号パルスの半値幅は $1.3\ \mu\text{s}$ から $0.45\ \mu\text{s}$ へと約 $1/3$ になっており、より短い時間幅のパルスがアンプの回路変更により得られることが実証された。次に、ディレイラインアンプの改造前後での出力波形変化をFig. 5に示す。未改造のディレイラインアンプ ($0.25\ \mu\text{s}$ ディレイライン)でも改造後のスペクトロスコピーアンプよりもパルス幅が短く、高計数率X線測定にはディレイラインアンプの方が有望であることが分かる。今回のディレイライン

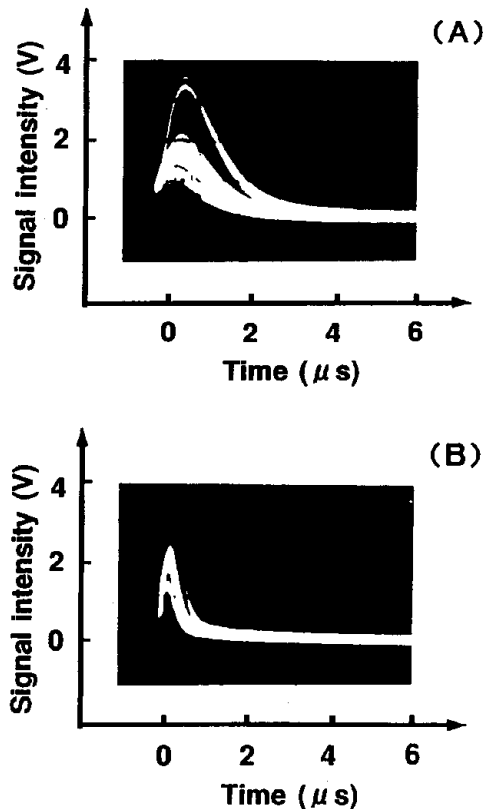


Fig. 4 Pulse shape changes of the spectroscopy amplifier by electric circuit modification. (A) before modification (FWHM= $1.3\ \mu\text{s}$) and (B) after modification (FWHM= $0.45\ \mu\text{s}$).

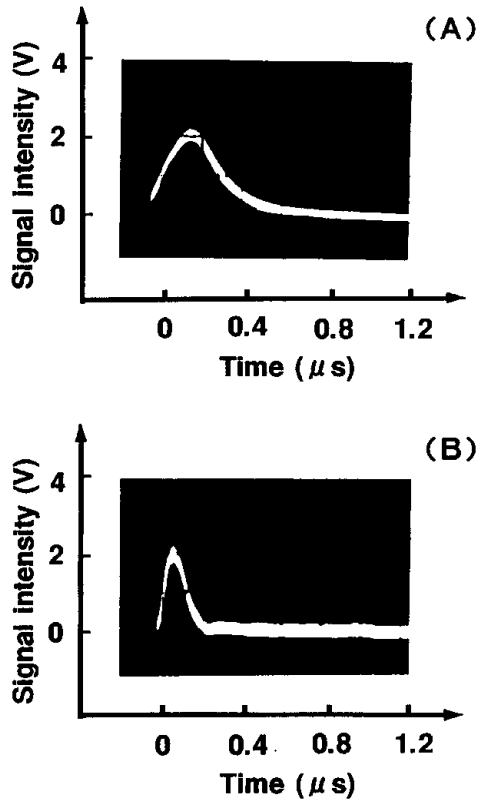


Fig. 5 Pulse shape changes of the delay-line amplifier by electric circuit modification.

(A) before modification (FWHM=0.3 μ s) and (B) after modification (FWHM=0.12 μ s).

アンプの回路変更によりパルスの半値幅は0.3 μ sから0.12 μ sへと1/2.5に短くなっており、さらに短い時間幅のパルスが得られている。

4種類のアンプについて不感時間を測定した結果を(1)式に従ってプロットしたのがFig. 6である。測定は一点につき入射光、透過光、入射光の順で3回の測定を行い、入射光強度についてはその平均を取った。統計変動による誤差を0.1%以下に抑えるためにそれぞれ100万カウント以上の積算を行った。挿入するアルミフォイルの枚数を変えて、約15点の測定をそれぞれのアンプについて行った。Fig. 6のプロットの傾きが不感時間に比例するので、傾き(の絶対値)が小さい方が高速であると言える。数え落としがなければ水平な直線($y = 2.32$)となるはずであるが、X線強度が大きくなるにつれて数え落としが顕著になるために右下がりのプロットとなる。先ほどの波形観察結果から予測される結果を定性的に裏付ける結果が得られている。

Fig. 6から直線回帰により検出器システム全体の不感時間 τ を求めた。その結果をTable 1に示す。未改造のスペクトロスコーピーアンプのデータに関しては I_0/I が1.6以下の

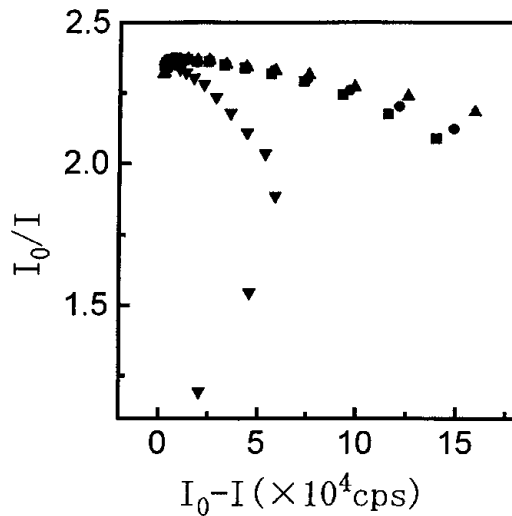


Fig. 6 Results of the dead time measurement. (▼) original and (■) modified spectroscopy amplifier, and (●) original and (▲) modified delay-line amplifier.

Table 1 Improvements in the X-ray counting characteristics of the gas-flow proportional counter system by modified amplifiers

	Shaping or delay time (μs)	Pulse width in FWHM (μs)	Dead time (μs)	Counting loss* (%)
Spectroscopy amplifier (OKEN 704-4)	0.4	1.3	3	75
	0.1	0.45	0.8	44
Delay-line amplifier (ORTEC 460)	0.25	0.3	0.6	38
	0.1	0.12	0.4	29

*Counting loss for 10^6 cps X-rays

2点は除いて処理を行った。得られた不感時間はアンプ以外のエレクトロニクスも含めた検出器システム全体の不感時間に相当するので、その改善率は波形観察結果 (Fig. 4, Fig. 5) ほど顕著ではないが、アンプの回路変更により確実に検出器エレクトロニクス的高速化が実現されていることが示された。0.1 μs デレイラインアンプが検討したアンプ中最高の性能 (FWHM = 0.12 μs) を示し、検出器システム全体として30%の数え落としで 10^6 cps以上の計数が可能となった。

4.2 シンチレーション検出器の結果

シンチレーション検出器を用いた場合のアンプの出力波形も、ガスフロー比例計数管の場合と同様にアンプの回路変更によるパルス成形の高速化が実現されていることを示すもので

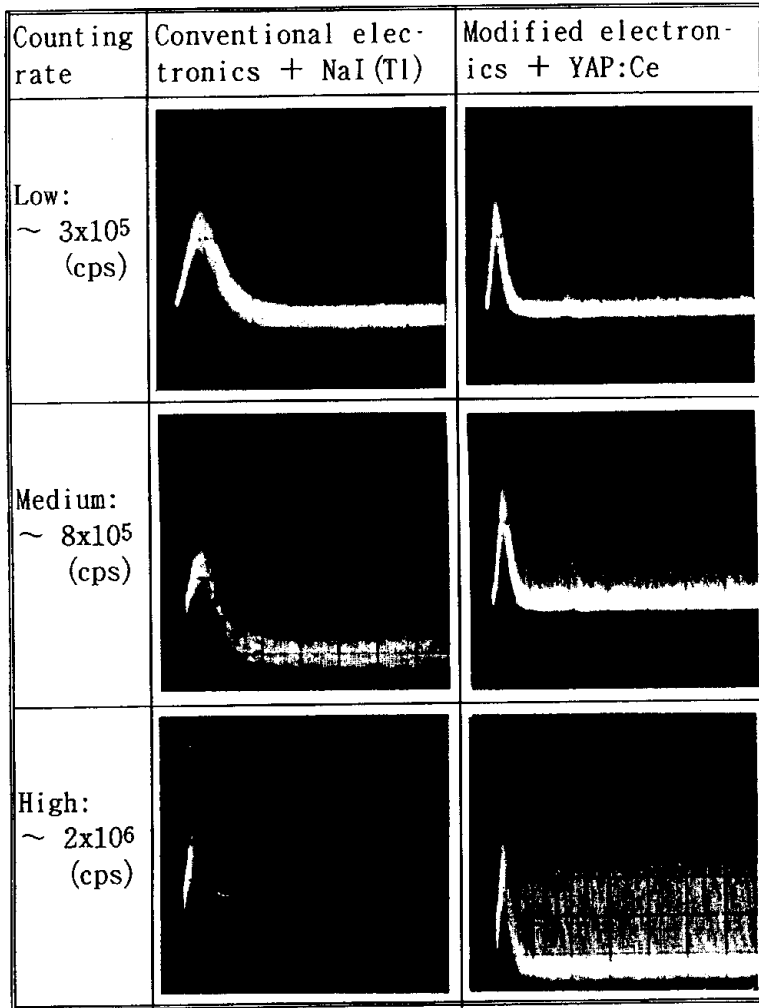


Fig. 7 Output pulse shapes from NaI(Tl)+conventional electronics and YAP:Ce+modified electronics for different counting-rate of incident X-rays.

あった。計数率を変化させたときの波形変化をFig. 7に示す。NaI(Tl)と通常のエレクトロニクスの組み合わせでは、入射X線が強くなると波高分布が乱れ、またベースラインも大きく変動してしまうので、精度の高い計数は望めない。それに対して、YAP:Ceと高速化エレクトロニクスの組み合わせでは、比較的高計数率領域まで追従できている様子が分かる。

X線の計数特性を測定した結果がFig. 8である。通常用いられているNaI(Tl)とエレクトロニクスの組み合わせではたかだか50万cpsが計数できる上限である。シンチレータ若しくはエレクトロニクスの何れか一方だけの高速化では計数特性にそれ程顕著な改善は見られなかったが、両方を高速化することにより100万cpsを越える強いX線でも計数可能となる。

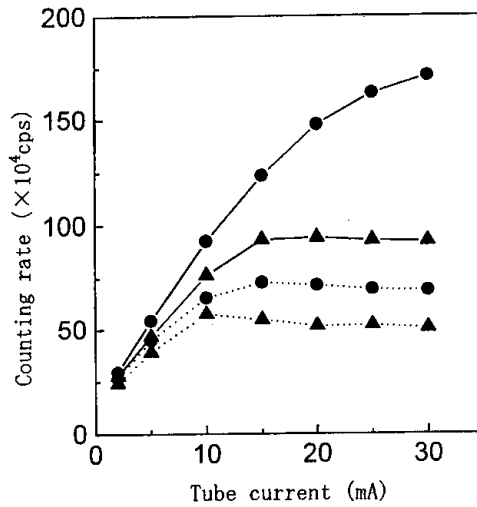


Fig. 8 Counting rate characteristics for conventional (dotted lines) and modified (solid lines) electronics. (▲) NaI(Tl) and (●) YAP:Ce.

Table 2 Comparison between the conventional and modified scintillation detector system.

Electronics	Scintillator	Pulse width in FWHM (μs)	Dead time (μs)	Counting loss* (%)
Conventional	NaI(Tl)	0.5	1.2	55
	YAP:Ce	0.35	0.71	42
Modified	NaI(Tl)	0.35	0.67	40
	YAP:Ce	0.19	0.26	21

*Counting loss for 10^6 cps X-rays

検出器の不感時間を求めた結果をまとめたのが Table 2である。シンチレータとエレクトロニクスの両方を高速化することにより、検出器の不感時間を $1.2 \mu s$ から $0.26 \mu s$ へと大幅に短縮することができた。この高速検出器システムでは、これまで半分以上数え落としていた 100 万 cps の X 線に対してもわずか 21 % の数え落としで計数する事が可能である。

5. おわりに

NIM規格のアンプの回路変更により高速化を実現し、 $10^5 \sim 10^7$ cps の X 線をより少ない数え落としで計数することを可能にした。特に、改造ディレイラインアンプは半値幅 $0.12 \mu s$ のパルス成形が可能であり、NIM規格のアンプに比べ極めて高い性能が得られた。一方、最高計数率の面ではディレイラインアンプには及ばないものの、スペクトロスコーピーアンプの

回路変更による高速化は非常に顕著であり、比較的手軽な高速化の方法として広く利用できるのでは無いだろうか。

また、Table 2の結果はアンプの高速化に伴いアンプ以外の不感時間が律速となって来ていることを示唆しており、今後はさらに高速な検出素子の探索、ディスクリミネータやカウンターの高速化など検出器システム総体としての高速化を図って行く必要がある。金属材料技術研究所のラボラトリーXAFS装置^{11,12)}においては既に、NaI (Tl) に代わる高速シンチレータとしてYAP : Ceが採用されており、超強力X線源からの高計数率X線計測に有効であることが確かめられている。

謝辞

本研究に対し有意義なご助言を頂いた姫路工業大学の伊藤正久助教授に深く感謝致します。また、セイコーEG & G(株)、応用光研工業(株)、ツジ電子(株)から技術的な協力を得たことを記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本金属学会会報, **24**, 871-961 (1985).
- 2) 伊藤正久: 私信.
- 3) M. Harada, K. Sakurai : *Rev. Sci. Instrum.*, **67**, 615 (1996).
- 4) V.G.Baryshevsky, M.V.Korzhih, V.I.Moroz, V.B.Pavlenko, A.A.Fyodorov, S.A.Smirnova, O. A.Egorycheva, V.A.Kachanov : *Nucl. Instrum. Meth.*, **B58**, 291 (1991).
- 5) M. V. Korzhik, O. V. Misevich, A. A. Fyodorov : *Nucl. Instrum. Meth.*, **B72**, 499 (1992).
- 6) S. Baccaro, K. Blazek, F. de Notaristefani, P. Maly, J. A. Mares, R. Pani, R. Pellegrini, A. Soluri : *Nucl. Instrum. Meth.*, **A361**, 209 (1995).
- 7) T. Fukamachi : *Jpn. J. Appl. Phys.*, **8**, 851 (1969).
- 8) M. A. Short : *Rev. Sci. Instrum.*, **31**, 618 (1960).
- 9) R. D. Burbank : *Rev. Sci. Instrum.*, **32**, 368 (1961).
- 10) K. Tanaka, K. Katayama, T. Amano : *Rev. Sci. Instrum.*, **31**, 467 (1960).
- 11) K.Sakurai, H. Sakurai : *Rev. Sci. Instrum.*, **64**, 267 (1993); **65**, 2417 (1994).
- 12) K. Sakurai, N. Osaka, H. Sakurai, H. Izawa : *Adv. in X-Ray Anal.*, **39** (1996), in press.