粒子線用パルス計測装置の試作, 第2部

Pulse Counting Apparatus for Particle Beam, Part II.

野瀬 直樹*・小寺 熊三郎*・榎田 勉*

NAOKI NOSE, KUMASABURO KODERA AND TSUTOMU MAKITA

(1972年1月30日受理)

Following Part I, design factors of the ratemeter and reversible decade counter for the pulse counting apparatus are discussed. The resolving time of the ratemeter is adjustable for $0.4 \mu\text{sec}$ and $40 \mu\text{sec}$. Counting accuracy is within 1% on all ranges at duty factor up to 90%. The resolving time of the decade counter is about 30 nsec, and its gate time is selective from 0.01 sec to 315 sec, and its output codes are fed to D-A converter. Also, this decade counter has a subtract gate for synchronous counting.

The overall pulse counting apparatus was tested by means of both square pulses and photomultiplier output pulses, and the results are satisfactory for particle counting.

1. 緒 言

前報¹⁾では、試作したパルス計測装置のうち前置増幅器・主増幅器・ディスクリミネータについて述べたが、本報では計数率計・計数器をとりあげる。そして、このパルス計測装置による光電子増倍管の出力パルスの計測結果について述べる。

2. 計 数 率 計

これは、単位時間あたりの平均計数値を連続的に電圧計で指示するものである。そして、入力パルスの波形をそろえる単安定マルチバイブレーターと、入力パルスの単位時間あたりの個数を、電圧に変換する積分器からなっている。

2.1 単安定マルチバイブレーター

これは、入力にトリガーパルスが一個加わると、波高・幅の一定な矩形パルスを一個だけ発生する。入力パルスの波形が変化する場合でも、出力パルスの波形は変化しない。用いたM53321は技術資料によれば、波高は $3.3V(V_{cc}=5.0V)$ であり、出力パルス幅は外付の抵抗 R_i とコンデンサー C_i で決まる時定数の約0.7倍である。入力トリガーの最小パルス幅は30 nsec、出力パルスのデューティサイクルが90%以下ならパル

ス幅は安定であるとなっている。後段の積分器の電圧増幅度は零点のドリフトをできるだけおさえるためには、10倍以上にはできない。そこで、Fig. 1のようにM53321を2個使用し、出力パルス幅を $0.4 \mu\text{sec}$ と $40 \mu\text{sec}$ にした。出力パルス波高はこのままでは少し低いので、2SC269のスイッチング動作により7Vにした。連動スイッチを①にすると、M53321の出力パルスがストップされ、計測中いつでも積分器の零点を調整できる。

2.2 積分器

この積分器は、単位時間内の入力パルスの個数 N を設定した時定数内で平均し、 N に比例した直流電圧 V_{out} を出力とするD-A変換器である。すなわち、 $V_{out} = kN$ (k は積分器によって決まる定数である)となる。そこでまず、演算増幅器-O. P. アンプ-の積分動作についての簡単な解析を行なってみた。(Fig. 2a)

O. P. アンプの入力インピーダンス Z_i および開ループ増幅度が無限大とみなせる場合、入力電流 i_{in} はすべて負帰還回路を流れ、 Z_i による電圧降下は非常に小さくなるため、④点は事実上接地点と同電位とみなしてよいといわれている。すると各部の電流は、

$$i_{in} = \frac{V_{in}}{R_i}, \quad i_{in} = i_c + i_R$$

* 京大工学部化学教室 (京都市左京区北白川追分町)

Department of Chemistry, Faculty of Science, Kyoto University (Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto).

Fig. 1. Monostable multivibrator.
IC-1, 2: M53321 (SN74121)
IC-3 : M53210 (SN7410)

Fig. 2a. Integrator.

Fig. 2b. Input and output waveforms of a integrator.

$$i_R = -\frac{V_{out}}{R_f}, \quad i_c = -C_f \frac{dV_{out}}{dt}$$

と与えられる。上式から、

$$V_{out} = -\frac{\exp\left(-\frac{t}{R_f C_f}\right)}{C_f R_f} \times \int_0^t V_{in} \exp\left(\frac{t}{R_f C_f}\right) dt \quad (1)$$

となる。

入力電圧が、

$$t \leq 0 \text{ のとき, } V_{in} = 0$$

$$t > 0 \text{ のとき, } V_{in} = V_0 = \text{一定}$$

の場合には、(Fig. 2b) $t \geq 0$ のとき、

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} V_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_f C_f}\right) \right\}$$

となり、時定数 $R_f C_f$ で $-R_f V_0 / R_i$ に近づく。(Fig. 2b)

また、波高 v_0 ボルト、幅 τ 秒の矩形パルスが、1 秒間あたり N 個積分器にはいる場合には、 $\tau \ll R_f C_f$ ならば、このパルス列は $v_0' = v_0 \tau N$ の直流電圧とみなしてよい。すると(1)式より積分器の出力電圧は、

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} v_0 \tau N \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_f C_f}\right) \right\}$$

となる。 $t \gg R_f C_f$ ならば、

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} v_0 \tau N$$

となり, 先程述べたように $V_{out} = kN$ となる。なお,

$$k = -\frac{R_f}{R_i} v_0 \tau$$

である。だから, $\tau \ll R_f C_f$ であれば, 出力直流電圧は単位時間あたりの入力パルスの個数に比例し, 時定数 $R_f C_f$ で変化することになる。

試作した積分器は, フィルブリックネクサスの QFT-2 を使用した。 $R_i = 1M\Omega$, $R_f = 5M\Omega$ としたので, 電圧増幅率は 5 倍におさえられている。(Fig. 3) 入力部の $5k\Omega$ の 10 回転ヘリポットは零点調節用である。積分時定数は, 0.05sec, 0.5sec, 5sec, の 3 段階で, R_i の入力側を接地した場合の出力電圧のドリフトは, $100 \mu V/min$ 程度であった。矩形波を入力として較正した結果, $N = 1.0 \times 10^0 \sim 1.0 \times 10^6$ cps の範囲で, $\tau \approx 0.4 \mu sec$ のとき $V_{out}(V) = -(1.00 \pm 0.01) \times 10^{-5} \times N$, $\tau \approx 40 \mu sec$ のとき $V_{out}(V) = -(0.97 \pm 0.01) \times 10^{-3} \times N$ となった。また, 単安定マルチバイブレーターの出力パルスのデューティサイクルが 90% 以下の時には, その入力トリガーパルス幅が $40 nsec$ 以上ならば, 上式は同様に満足された。

2.3 計数器および計数率計の数え落し

2 個の連続したパルスが計数器に入った時, 計数器が 2 個と計数するために必要とされる 2 個のパルスの最小の分離時間を計数器の分解時間という。前述の計数率計において, 単安定マルチバイブレーターの出力パルス幅が $0.4 \mu sec$ の時, 2 個のパルスが $0.4 \mu sec$ より

も短い時間間隔で入った場合には, Fig. 4 のようになり, 積分器の出力は $0.4 \mu sec$ 以上離れた 2 個のパルスの場合の出力より小さくなってしまふ。この状態を「計数器の数え落し」といい, 計数率計の分解時間は $0.4 \mu sec$ になる。同様に, $40 \mu sec$ の矩形パルスを使用する場合は, 分解時間は $40 \mu sec$ である。次章に述べる 10 進計数器の分解時間は約 $30 nsec$ であり, 計数率計にくらべて分解時間は非常に小さい。だから, 計数率計の指示をそのまま計数値としてみることは避けた方がよい。もっとも単安定マルチバイブレーターの出力パルス幅を小さくすれば分解時間は短縮できるが, それだけ出力パルスの波高または積分器の電圧増幅率を大きくしなければならない。ところが, O. P. アンプの最大入力電圧はせいぜい $10V$ であり, また, 電圧増幅率を大きくすれば, 零点のドリフトが増加するから, 分解時間を短縮しても計数率計の根本的な改善にはならない。

ここで, 分解時間 τsec の計数器はどれ位の数え落しをするかを見積る。平均 $N cps$ のパルスが入射し, ある一定時間 $T sec$ 計測した結果, $N' cps$ と表示されたとすると, T 秒間の計数器の不感時間は $N' \tau T$ 秒だから,

$$NT = N' T + NN' \tau T$$

となり, 数え落しの割合は,

$$\frac{N - N'}{N} = N' \tau$$

Fig. 3. Integrator.

Fig. 4. Pile-up in a series of output pulses of the monostable multivibrator.

である。分解時間 30nsec の計数器の指示が 1×10^6 cps であったとすれば、数え落しは 3% になる。計数率計は分解時間が大きいので、計数値が大きい時はたえず上式のような補正をしなければならぬが、Metz²⁾からは自動的にこの補正を行なう計数率計を発表している。ただし、この補正だけで真の計数値を求めたとするのは、少し問題があると思われる。

3. 加減算 10 進計數器

これは、入力パルスを一定時間（ゲートタイム）蓄積・計数し、その合計パルス数を表示するものである。試作した計数器は、加算・減算・加減算機能をもつほか、入力パルスの周期測定も可能である。(Fig. 5, Fig. 6) ゲートタイムは0.01~315secである。分解時間は約30nsec、測定誤差は、数字表示管による読取りの場

合0.01%以下、D-Aコンバータ出力の記録計表示の場合1%以下である。入力パルスは負極性だけが測定可能で、その幅は30nsec以上、波高は1.5Vから5.0Vの間に入る必要がある。なお、入力インピーダンスは50Ωである。

3.1 Transmission Gate および Signal Gate

Fig. 7 に示されるように、IC-1-2~4、IC-2-2~4、IC-3-1~2 で transmission gate を形成する。SW-1 は測定と内部較正 (10kHz) の切り換え用、SW-2 は周波数測定と周期測定の切り換え用である。IC-3-3 は加算部の、IC-4-1 は減算部の signal gate である。周期測定は加算部で行なう。なお SW-3 と 4 により、加算のみ、減算のみ、または加減算の選択を行なう。

Fig. 5. Block diagram of a 6-stage add-subtract decade counter for frequency measurement.

Fig. 6. Block diagram for period measurement.

Fig. 7. Transmission gates and signal gates.

IC-1, 2 : M5340 (SN7400)

IC-3 : M5330 (SN7410)

IC-4 : M5325 (SN7440)

3.2 Crystal Oscillator および Time-base Generator

Fig. 8 に示されるように, crystal oscillator は, 水晶発振子と IC-5 で形成される無安定マルチバイブレーターであり, 水晶 (1.00000 ± 0.00001 MHz) により発振周波数を制御している。IC-6~14 は time-base generator であり, そのうち IC-6~12 は $1/10$ 減衰器, IC-13 は $1/2$ 減衰器である。なお, IC-10~12 は $1/5$ 減衰器としても使用している。出力パルスのうち, 1MHz, 100kHz, 10kHz は周期測定に使われ, SW-5-1 で選択後, 直接, 加算部の signal gate に入る。100Hz 以下は周波数測定に使われ, SW-5-2 で選択後, Fig. 9 の IC-17-1 により デューティサイクル 50% のゲートパルスとなり, signal gate に入る。Fig. 8 に時間単位で記入したのは, IC-17-1 を出た後のゲートパルスの幅である。ゲートタイムが 5 sec 以上の時は, SW-6~11 の組みあわせにより, 5 sec おきに 315 sec まで任意に選択できる。

3.3 Display-time Controller

ゲートタイムが 0.01~1 sec までは表示時間を伸ばし, 5 sec 以上では短縮して, 数字表示管の読取りを容易にする回路 (Fig. 9) である。表示時間は 0.1~3.0 sec の間で, IC-21 の 50k Ω VR を調整することにより, 任意に設定できる。SW-12 を押すことにより, ゲー

トタイムが 5 sec 以上の場合に限り, いつでも計測を開始できる。SW-13 は, Fig. 10 の IC-28~33 の memory 回路を停止するもので, 計測中の表示数の変化を観測できる。

3.4 Decade Counter, Memory, Decoder /Driver

Fig. 10 に示すように, IC-22~27 は 10 進 up/down synchronous counter, IC-28~33 は memory 回路で, クロックパルスが入った時にのみ, IC-22~27 の出力データを読み込み, IC-34~39 に伝える。IC-34~39 は BCD コードを 10 進コードに変換するデコーダーおよびニキシ管を点火するドライバーである。Fig. 10 には書いてないが, D-A コンバータへのデータは, IC-28~33 の $\bar{Q}$ 出力から取りだす。すなわち, A コードは①番端子, B コードは⑩番端子, C コードは⑧番端子, D コードは⑬番端子からとる。SW-14 は入力の有無にかかわらず, 表示管をすべて零にでき, D-A コンバータの零点調整に使用する。

3.5 Stage Select Switch

後段の D-A コンバータの出力はレコーダーに導かれるから, その読取値は少なくとも 0.1% 程度の誤差を伴う。そのため D-A コンバータの入力は 3 桁あれば充分で, Fig. 11 のロータリースイッチにより Fig. 10 の 6 桁の memory 出力から任意の 3 桁を選択

Fig. 8. Crystal oscillator and time-base generators.

IC-5, 15: M5340 (SN7400)
IC-6~12: M53290 (SN7490)
IC-13: M53293 (SN7493)

Fig. 9. Display-time controller.

IC-16: M5330 (SN7410), IC-17: M53274 (SN7474),
IC-18: M5325 (SN7440), IC-19: M53204 (SN7404),
IC-20, 21: M53321 (SN74121)

粒子線用パルス計測装置の試作, 第2部

Fig. 10. Counters, memories, decoder-drivers, and readout indicators.
IC-22~27: M53390 (SN74190), IC-28: M53275 (SN7475),
IC-34~39: M53241 (SN7441)

Fig. 11. Stage select switch.

する。

3.6 Inhibit Pulse Generator, Transmission Gate, および D-A Converter

Fig. 10 の memory 出力のうち, たとえば 10^3 , 10^2 , 10^1 の 3 桁を選択して D-A コンバータに送る場合, もし 10^4 以上の桁にデータがあっても, D-A コンバータの出力はやはり 10^3 , 10^2 , 10^1 の桁のデータによるものになる。それを防止するのが, Fig. 12 の IC-40~

43 の inhibit pulse generator と IC-44~49 の transmission gate で, 上記のような場合には, transmission gate の出力コードは 999 となり, D-A コンバータの出力は最大出力電圧 (10V) に固定される。SW-16 はこの inhibit 動作を停止するもので, オーバーした桁の表示がわかっている場合には, それ以下の桁の表示が可能である。D-A コンバータは入力 3 桁の BCD コード用であり, SW-17 により安定化

された基準電圧(−6.2V)を外部から導入することにより、さらに正確な動作をおこなえる。

4. 同期回路

SEMに入射する粒子には、計測すべきものだけでなく、計測不要なものが混入することがある。たとえば複雑な散乱粒子である。この2種の粒子はSEMの出力部において同程度の波高のパルスが発生させて、前報のディスクリミネータでは、それらを区別するこ

とは不可能である。この困難さを除去するためには、同期回路³⁾が使用され、検出器が光電子増倍管(P.M.)^{4,5)}の場合には雑音パルスを除去するための同期計測法がひんばんに用いられている。

Fig. 13 において信号パルスの単位時間あたりの数を f_s 、雑音パルスの数を f_n とする。なお、 $f_s \gg f_n$ のときは、同期計測をする必要がない。粒子源からでる粒子線を機械的のチョッパーで断続すると、チョッパーが閉じた時(close)ディスクリミネータの単位時間あ

Fig. 12. Inhibit pulse generator, transmission gates, and D-A converter.

IC-40, 44~49: M5340(SN7400), IC-41, 43: M5325(SN7440),
IC-42: M53274(SN7474), IC-50: Teledyne Philbrick 4009

Fig. 13. Block diagram for synchronous pulse counting.

たりの出力パルス数は f_n であり, チョッパが開いた時(open) $f_n + f_s$ になる。そこでランプからの光を同じチョッパで断続し, 光電子で電圧パルスに変換・増幅した後, 同期回路に送り込む。これにより, 同期回路出力には, $f_n + f_s$ または f_n が同期パルスの1周期ごとに交互にあらわれる。それを加減算計数回路で一定時間蓄積・計数すれば, その出力は f_s である。同期回路の動作は, Fig. 14のとおりであるが, 同期パルス周期の数倍程度の時間内に f_n および f_s が大きく変動してはならない。試作した同期回路を Fig. 15にあげる。入力パルス, 同期パルス共, 2~4 Vに増幅しておく必要がある。

5. 試作パルス計測装置による光電子増倍管の出力パルスの計数

前報¹⁾において, 試作した前置増幅器・主増幅器・ディスクリミネータについて, SEMの出力パルスと同程度の波高・幅をもつと考えられる矩形テストパルスを利用した試験の場合に, 所期の結果が得られたことを述べた。そこで, 本報の計数器と合わせて, 計測装置全体を実際に用いる SEM の出力パルスによって検討するため, 光電子増倍管(P. M.)*を使用し, それ

に微弱光を入射させ, その出力パルスを計測した。(Fig. 16)

P. M. のアノードと前置増幅器を浮遊容量100pF程度のシールドワイヤーで結合した。そして, 出力電圧パルスの減衰時定数を小さくして出力パルス間のパイラップを少なくするために, アノード抵抗は1k Ω にした。なお, P. M. は常温で用い, -1040Vの負高電圧をカソードに印加後10分経過してから計測を開始

Fig. 14. Timing chart of synchronous pulse counting.

Fig. 15. Synchronous circuit.

Fig. 16. Block diagram for counting output pulses from P. M.

* 東芝MS-9S サイドウィンド型10段

印加電圧-1000Vにおいて, 増幅度 2×10^6 , 暗電流0.05 μ Aと発表されている。

した。微弱光源としては P.M. を入れた「暗箱」に漏洩する室内光を利用したが、実験室を「暗室」にして室内光を点灯および消灯した時、それぞれ適当な強度の漏洩光が得られた。Fig. 17 はディスクリミネータの弁別電圧の変化による計数値の変化を示している。(×) は実験室内を点灯した場合、(○) は消灯した場合、(△) は(○) よりもさらに漏洩光を少なくした場合である。計数時間は10秒で、計数値の読取りは数字表示管によった。測定は弁別電圧を設定した後、各点5回ずつ行ないそれらを平均した。各点上の垂直線は計数値の標準偏差であるが、垂直線の記入されていない点では標準偏差は平均計数値の10%以下である。なお、前置増幅器以下で発生する雑音パルスは弁別電圧0.15V において1 cps 程度であったから、弁別電圧が0.15V 以上において計数されたパルスはすべて P.M. の出力パルスである。

P.M. 出力パルスの減衰時定数は $0.1 \mu\text{sec}$ ($R_a = 1 \text{ k}\Omega$, $C_a \approx 100 \text{ pF}$) だから、前報¹⁾ で述べたように出力パルス幅は半値幅で $0.2 \mu\text{sec}$ 以内と推定され、この計測装置全体の分解時間は $1 \mu\text{sec}$ を越えることはない。Fig. 17 における最大計数値 350 cps において数え落しの割合は、

$$350 \times 10^{-6} \times 100 = 3.5 \times 10^{-2}$$

となるから、Fig. 17 に示された各計数値の数え落しの割合は $3.5 \times 10^{-2} \%$ 以下である。

Fig. 17 において入射光の最も少ない場合(△)、弁別電圧によって計数値の変化の大きい所は、0.20V 以下と 0.80V 付近であるから、ディスクリミネータの入力パルスには、波高が 0.20V 以下と 0.80V 付近のものが多く、0.20~0.50V 付近のものはほとんどないといえる。入射光の多い場合(○, ×) も、0.20~0.50V 付近で入射光の変動によると思われる計数値の揺動があるが、やはり 0.80V 付近に波高をもつパルスが多い。(△) の場合波高が 0.20V 以下のパルスは、P.M. のカソードおよびダイノードからの熱電子放射によるパルスと考えられる。そして、入射光による P.M. の出力パルスは、増幅後の波高が 0.80V 程度になるものになり多くなる。だから、弁別電圧を 0.20~0.50V の間に設定すれば、ほとんど入射光のみによるパルスが計測できる。すなわち、この試作パルス計測装置は他のアナログ計測方式にくらべて S/N 比が大きいというパルス計測方式の特徴を充分発揮していることがわかった。なお、増幅器・ディスクリミネータの入

Fig. 17. Counting rates of output pulses from P.M.
Light inputs are more intense for (×) than (○), and very weak for (△).

出力部における波形を正確に観測するのに必要な測定器を利用できなかったのも、各回路の P. M. の出力パルスに対する特性を決定できなかったのは残念である。

今後、次の点について改善を要すると考えている。

- 1) S/N比を増大させるために、アノード抵抗を $100\text{ k}\Omega \sim 1\text{ M}\Omega$ にして、SEMの出力パルス波高を大きくする。
- 2) パルス間のパイルアップを防止するために、増幅器内に遅延線路クリッピング回路⁶⁾を挿入する。
- 3) 高計数率の場合のディスクリミネータの弁別特性の変化を少なくするために、直流分再生回路⁷⁾を挿入する。
- 4) SEM 出力パルスに対する各回路の諸特性を正確に決定する。

この装置を試作するにあたり京都大学工学部森末秀雄氏に有益な討論をいただいたことを感謝したい。また研究費の一部を文部省科学研究費補助金によることのできたことを感謝する。

文 献

- 1) 野瀬・小寺・楨田, 質量分析, **19**, 274 (1971).
- 2) A. J. Metz, and R. H. Howard, *Rev. Sci. Instrum.*, **40**, 16 (1969).
- 3) K. T. Dolder, "Case Studies in Atomic Collision Physics I", ed. E. W. McDaniel and M. R. C. McDowell, p. 263 (1969).
- 4) F. T. Arrechi, E. Gatti, and A. Sona, *Rev. Sci. Instrum.*, **37**, 942 (1966).
- 5) 小林・稲葉, 応用物理, **36**, 743 (1967).
- 6) J. L. Blankenship and C. H. Nowlin, *IEEE Trans. NS-13-3*, 495 (1966).
- 7) S. J. Rudnick, J. J. English, and R. H. Howard, *Rev. Sci. Instrum.*, **40**, 9 (1969).