



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 603 15 870 T2 2008.05.15**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 565 763 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **603 15 870.6**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/FR03/50125**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **03 786 061.6**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2004/051314**

(86) PCT-Anmeldetag: **20.11.2003**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **17.06.2004**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **24.08.2005**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **22.08.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **15.05.2008**

(51) Int Cl.⁸: **G01T 1/24 (2006.01)**
G01T 1/17 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
0214737 25.11.2002 FR

(73) Patentinhaber:
Commissariat à l'Energie Atomique, Paris, FR

(74) Vertreter:
**Grünecker, Kinkeldey, Stockmair &
Schwanhäusser, 80538 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB, IT

(72) Erfinder:
**OUVRIER-BUFFET, Patrice, F-74410 Saint-Jorioz,
FR; RUSTIQUE, Jacques, F-38170 Seyssinet, FR;
VERGER, Loick, F-38000 Grenoble, FR**

(54) Bezeichnung: **VERBESSERTE SCHALTUNGSANORDNUNG FÜR SPEKTROMETRIE UND SPEKTROMETRISCHES SYSTEM, DAS DIESE ANORDNUNG VERWENDET**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

TECHNISCHER BEREICH

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Verarbeitungsschaltung für Spektrometriketten und eine mit einer solchen Schaltung ausgestattete Spektrometrikette. Eine Spektrometrikette ist eine Vorrichtung zur Messung der Energie einer in einen Strahlungsdetektor einfallenden Partikelstrahlung. Eine solche Spektrometrikette ermöglicht auch, die Zahl der pro Zeiteinheit einfallenden Partikel zu zählen. Unter Partikelstrahlung versteht man die Emission oder den Transfer von Energie in Form von Partikeln. Die Strahlung kann zum Beispiel durch Photonen gebildet werden (wobei die Photonen als stabile Elementarpartikel betrachtet werden), eine Gammastrahlung sein, die eine durch Photonen gebildete Strahlung ist, die im Laufe eines Kernübergangs- oder Partikelannihilationsprozesses abgestrahlt werden, eine Röntgenstrahlung oder ein Neutronen- oder Protonenflusses sein.

[0002] Die Spektrometriketten finden Anwendung insbesondere im medizinischen Bereich, bei der zerstörungsfreien Werkstoffkontrolle oder bei der wissenschaftlichen Instrumentierung. Auf dem Gebiet der medizinischen Bildverarbeitung gibt es eine schnelle Entwicklung von Gammakameras mit zweidimensionalen Strahlungsdetektoren. Bei eindimensionalen Strahlungsdetektoren erscheinen zahlreiche Monokanalsonden auf dem Markt; es handelt sich zum Beispiel um präoperative Sonden, nukleare Sonden zur Kontrolle von bestrahlten Brennelementen, Sonden für wissenschaftliche Instrumentierung.

STAND DER TECHNIK

[0003] Die Spektrometriketten umfassen üblicherweise einen Partikelstrahlungsdetektor, eine Verarbeitungsschaltung des durch den Detektor gesendeten Signals und eine Schaltung zur Erfassung des durch den Detektor gelieferten Signals nach der Verarbeitung. Die Spektrometriketten benutzen vorzugsweise Strahlungsdetektoren auf der Basis von Halbleitern wie CdZnTe, CdTe:Cl, CdTe:In, was ihnen ermöglicht, bei Umgebungstemperatur zu arbeiten und dabei kompakt zu sein, das sie keine Kühlvorrichtung benötigen. Diese Strahlungsdetektoren haben weitere Vorteile. Da sie die Strahlung direkt in ein elektrisches Signal konvertieren (generell in Form eines elektrischen Stromes), anstatt das Stadium der elektrischen Ladungen zu durchlaufen, wie im Falle eines einem Photovervielfacher zugeordneten Szintillators, ermöglichen sie eine sehr gute Energieauflösung.

[0004] Die Verarbeitungsschaltung muss die Energie aller einfallenden Partikel, die mit dem Detektor interagiert haben, mit der größtmöglichen Genauigkeit zählen und messen (man spricht dann von Detektionswirkungsgrad).

[0005] Je nach Anwendungsbereich wird die einfallende Partikelstrahlung durch ein Energiespektrum von mehr oder weniger zahlreichen Partikel (Photonen, Neutronen oder Protonen) mit einem sehr variablen Energiebereich gebildet (zum Beispiel von einigen keV bis einige MeV bei einer Gammaspektrometrie). Man muss also die Geometrie des Halbleiterdetektors, zum Beispiel seine Fläche und seine Dicke, entsprechend anpassen, um den Detektionswirkungsgrad und die Empfindlichkeit der Spektrometrikette wie erwünscht zu erhalten. Zum Beispiel ist eine Dicke von weniger als einem Millimeter ausreichend, um die Mehrzahl der Niederenergiephotonen aufzuhalten, während zum Aufhalten von Photonen mit höherer Energie eine Dicke von einigen Millimetern ja sogar einem Zentimeter notwendig sein kann. Unter Niederenergie versteht man Energien unter ungefähr 100 keV.

[0006] Die Schwierigkeit, eine Qualitätsspektrometrie zu erhalten ist bei hoher Energie schwieriger als bei niedriger Energie, denn das Volumen (das heißt das Produkt aus Fläche und Dicke) des Halbleitermaterials muss bei der Absorption von Partikeln mit hoher Energie größer sein. Eine große Dicke ermöglicht, ein Maximum an Partikeln aufzuhalten. Die Interaktions-Wahrscheinlichkeit ist höher. Hingegen wird es mit zunehmendem Volumen schwieriger, über den gesamten Weg der durch die Konvertierung in dem Detektor erzeugten Ladungen ein homogenes Feld aufrechtzuerhalten und auch die Einfangeffekte der Ladungen in dem Halbleitermaterial zu vermeiden.

[0007] Diese aufgrund der Tatsache kumulierten Effekte, dass in verschiedenen Zonen des Detektors Ionisationsladungen erzeugt werden, implizieren, dass die dicken Detektoren Stromimpulse mit größeren Formschwankungen liefern. Dieser Stromform-Schwankungseffekt ist unter der Bezeichnung "ballistisches Defizit" bekannt.

[0008] Man versucht also, die Verarbeitungsschaltung an diese große Stromformschwankung anzupassen, so dass sie ein Signal liefert, das den Wert der Energie der einfallenden Partikel mit der größtmöglichen Genauigkeit wiedergibt. Anders gesagt versucht man, das ballistische Defizit zu kompensieren und den Zählungsgrad zu verbessern.

[0009] Die konventionellen Verarbeitungsschaltungen umfassen mehrere sukzessive Stufen, von denen die erste ein Ladungsvorverstärker ist, dazu bestimmt, mit dem Detektor verbunden zu werden, die zweite ein Impulsfilter ist und die dritte eine Messstufe der Amplitude der Impulse ist, die man am Ausgang des Impulsfilters erhält. Eine solche Verarbeitungsschaltung ist in der [Fig. 1](#) dargestellt.

[0010] Der Ladungsvorverstärker trägt die Referenz **10**. Es ist ein Verstärker A1, realisiert mit diskreten Bauelementen (zum Beispiel einem Feldeffekttransistor) oder integrierten Bauelementen, zum Beispiel des Typs ASIC, geschaltet als Stromintegrierglied oder Stromintegrator. Die Operationsverstärker sind an diese Funktion nicht angepasst, da zu geräuschvoll. Ein Integrationskondensator C1 ist bzw. wird zum Operationsverstärker A1 parallelgeschaltet, zwischen dem Eingang und dem Ausgang. Der Operationsverstärker A1 empfängt am Eingang ein elektrisches Signal i_1 , das von einem Halbleiterpartikelstrahlungsdetektor **11** stammt. Dieser Detektor **11** ist in einer Teilerbrücke **12** in Serie geschaltet mit einem Widerstand R_p . Die Teilerbrücke **12** ist zwischen zwei Anschlüssen **13**, **14** zur Versorgung einer Versorgung (nicht dargestellt) geschaltet. Diese Teilerbrücke besitzt einen gemeinsamen Punkt zwischen dem Widerstand R_p und dem Detektor **11** und dieser gemeinsame Punkt ist mit dem Eingang des Operationsverstärkers durch einen Kondensator C2 verbunden. Das Signal i_1 ist ein Impulsstrom, Detektorstrom genannt. Diese Impulse können eine Vielzahl von Formen annehmen.

[0011] Die Kurven A und B der [Fig. 2](#) sind Chronogramme des Detektorstroms i_1 am Eingang des Ladungsvorverstärkers **10** und der Spannung v_1 , geliefert durch den Ausgang des Ladungsvorverstärkers **10**.

[0012] Während der Präsenzzeit der Stromimpulse i_1 beträgt die Spannung v_1 am Ausgang des Vorverstärkers:

$$V_1 = -1/C_1 \int i_1 dt = -Q/C_1$$

[0013] Q ist das Quantum der durch ein Partikel emittierten Ladungen, das mit dem Detektor **11** interagiert hat. Am Ausgang des Ladungsvorverstärkers **10** nimmt die Spannung v_1 bei fehlendem Stromimpuls i_1 ab. Dieses Zeitintervall wird Relaxationszeit τ_1 genannt. Die Information, die der Energie der Partikel entspricht, ist flüchtig. Man muss die Spannung v_1 nach dem Verschwinden eines Stromimpulses i_1 schnellstmöglich speichern.

[0014] Die Spannung v_1 wird an den Eingang eines Impulsfilters **15** gelegt. Es handelt sich um ein Tiefpassfilter, das ermöglicht, den Rauschabstand zu optimieren. Es sind schon zahlreiche Impulsfilter entwickelt worden, darunter die Filter mit n Differenzierungen und n Integrierungen, die gaußschen oder semigaußschen Filter, die Trapezfilter, die Dreiecksfilter, die Digitalfilter. Oft sind diese Filter abstimmbare und es ist möglich, durch Regelung der Differential- und Integralzeitkonstanten und auf experimentelle Weise den Rauschabstand in dem Nutzfrequenzband bestens zu justieren. Bekanntlich eignen sich die Semigauß- oder Dreiecksfilter gut für hohe Zählraten, denn sie ermöglichen ein schnelleres Formen der Impulse.

[0015] Der Zweck ist, am Ausgang des Bandpassfilters **15** Impulse mit einer Spannung zu erhalten, deren Amplitude A_m proportional zur Energie der Partikel ist, die mit dem Detektor **11** interagiert haben. Die Kurve C der [Fig. 2](#) zeigt die am Ausgang des Impulsfilters **15** vorhandene Spannung v_2 . Man sieht, dass das Impulsfilter **15** die Zeitinformation verändert, die der Dauer des Stroms i_1 entspricht, die durch den Detektor **11** geliefert wird. Die Breite der Impulse erhöht sich aufgrund der durch den Impulsfilter realisierten Differenzierung und Integrierung. Dieser Effekt reduziert die maximal zulässige Zählrate, indem er die Anzahl der Stufen in der Verarbeitungsschaltung erhöht.

[0016] Es ist möglich, dass ein Detektorstromimpuls i_1 des Rangs i (i als ganze Zahl ≥ 2) eintrifft, bevor die Spannung v_2 wieder den Wert annehmen kann, den sie zu Beginn des Detektorstromimpulses i_1 des Rangs $i - 1$ hatte. Wenn die Amplitude der Spannung v_2 während des Detektorstromimpulses i_1 des Rangs $i - 1$ $A_m + e_1$ beträgt, beträgt die Amplitude der Spannung v_2 während des Detektorstromimpulses i_1 des Rangs i $A_m + e_1$ und die Amplitude der Spannung v_2 während des Detektorstromimpulses i_1 des Rangs $i + 1$ $A_m + e_2$. Die Amplitude der Spannung v_2 weist umso mehr Fehler auf, je höher die Zählrate ist.

[0017] Ein weiterer Nachteil des Impulsfilters **15** ist seine schlechte Linearität im Falle von dicken Detektoren, die Stromimpulse mit starken Formschwankungen liefern. Dieser Nachteil entspricht dem mit "ballistisches Defizit" bezeichneten Fehler. Um zu versuchen, diesen Fehler zu reduzieren, kann man die Zeitkonstante des Filters sehr viel höher als die Dauer der Impulse des Detektorstroms i_1 wählen. Diese Lösung steht im Widerspruch zu dem Wunsch, eine Spannung v_2 mit kurzen Impulsen zu erhalten, was eine hohe Zählrate ermöglicht.

[0018] Der Ausgang des Impulsfilters ist mit Einrichtungen **16** zum Messen der Amplitude der am Ausgang des Impulsfilters **15** erhaltenen Impulse verbunden. Mehrere Schaltungen können benutzt werden, um diese Amplitudenmesseinrichtungen **16** zu realisieren. Man kann zum Beispiel einen Spitzendetektor auf der Basis von Dioden oder einen aktiven Integrator nennen, der durch Umschalten gesteuert werden kann. Generell gilt, dass der durch Umschalten gesteuerte Integrator ermöglicht, höhere Zählraten zu erreichen.

[0019] Die Amplitudenmesseinrichtungen **16** der [Fig. 1](#) umfassen einen als Integrator geschalteten Operationsverstärker A2. Zwischen dem Eingang und dem Ausgang des Operationsverstärkers A2 ist ein Integrationskondensator C3 geschaltet. Ein Widerstand R3 ist mit einem Ende mit dem Eingang des Operationsverstärkers verbunden und mit einem anderen Ende und durch einen ersten Schalter SW1 mit dem Ausgang des Impulsfilters **15**. Ein zweiter Schalter SW2 ist zu dem Integrationskondensator C3 parallelgeschaltet. Er dient zur Nullrückstellung des Integrators.

[0020] Nun wird auf die [Fig. 3](#) Bezug genommen, die in Form eines Chronogramms und schematisch jeweils das Impulssignal v_2 , geliefert durch das Impulsfilter (Kurve A), und das Signal v_3 , geliefert durch die Messeinrichtungen der Amplitude der am Ausgang des Impulsfilters erhaltenen Impulse (Kurve B). Bevor das von dem Impulsfilter **15** stammende Signal v_2 den Eingang der Amplitudenmesseinrichtungen **16** erreicht, das heißt vor einem Zeitpunkt t_0 , ist der erste Schalter SW1 offen und der zweite Schalter SW2 ist geschlossen. Sobald das Signal v_2 einen Schwellenwert s überschreitet, zum Zeitpunkt t_0 , schließt sich der erste Schalter SW1 und öffnet sich der zweite Schalter SW2. Die Amplitudenmesseinrichtungen **16** beginnen, das Signal v_2 zu integrieren, bis zu einem Zeitpunkt t_1 , wo das Signal v_2 den Schwellenwert s nach unten durchschreitet. Zu diesem Zeitpunkt t_1 öffnet sich der erste Schalter SW1. Das Signal v_3 , geliefert durch die Amplitudenmesseinrichtungen **16**, hat eine Amplitude kA_m , die proportional ist zu der Amplitude A_m des Signals v_2 . Aber diese Amplitude kA_m ist zu der Energie des Partikels, das mit dem Detektor **11** interagiert hat, nur proportional sofern die Amplitude A_m die Energie des Partikels getreu wiedergegeben hat. Man hat weiter oben gesehen, dass dies aufgrund der durch das Impulsfilter **15** eingeführten Fehler nicht immer der Fall war.

[0021] Von einem Zeitpunkt t_1 bis zu einem Zeitpunkt t_2 wird das Signal im Wesentlichen konstant gehalten, um seine Amplitude in einer Erfassungsvorrichtung **17** speichern zu können, die mit dem Ausgang der Amplitudenmessvorrichtung **16** verbunden sind. Ab dem Zeitpunkt t_2 ist der zweite Schalter SW2 geschlossen, was die Wirkung hat, das Signal v_3 wieder auf Null zu stellen. Die Amplitudenmesseinrichtungen **16** sind dann bereit, ein neues Partikel zu behandeln.

[0022] Das Patent US-4 727 256 zeigt alle Charakteristika des Oberbegriffs des Anspruchs 1.

OFFENBARUNG DER ERFINDUNG

[0023] Die vorliegende Erfindung hat die Aufgabe, eine Verarbeitungsschaltung für eine Spektrometriekette zu realisieren, welche die oben genannten Einschränkungen und Schwierigkeiten nicht aufweist, wobei diese Schwierigkeiten insbesondere auf das Impulsfilter zurückzuführen sind.

[0024] Sie hat die Aufgabe, eine Verarbeitungsschaltung für eine Spektrometriekette vorzuschlagen, fähig ein Signal zu liefern, das die Energie der einfallenden Partikel genau wiedergibt, und dies sogar bei hohen Zählraten.

[0025] Um dies zu erreichen, empfiehlt die Erfindung, das Impulsfilter durch einen Differenzierer zu ersetzen, der ein Signal liefert, das eine getreue Abbildung von demjenigen ist, das von dem Strahlungsdetektor stammt und das repräsentativ ist für die Energie von Partikeln, die mit dem Detektor interagieren.

[0026] Noch genauer ist die vorliegende Erfindung eine Verarbeitungsschaltung für eine Spektrometriekette, die einen speziellen Strahlungsdetektor umfasst, wie dargestellt in Anspruch 1. Diese Verarbeitungsschaltung umfasst eine Ladungsvorverstärkerstufe, die mit einem Detektorstrom gespeist wird, der repräsentativ ist für das Quantum der durch ein Partikel emittierten Ladungen, das mit dem Detektor interagiert hat, und eine Inte-

gratorstufe. Eine Differenzierstufe ist zwischen der Ladungsvorverstärkerstufe und der Integratorstufe geschaltet, wobei die Differenzierstufe ein von der Ladungsvorverstärkerstufe stammendes Signal empfängt und der Integratorstufe ein Abbildungssignal des Detektorstroms liefert, wobei die Integratorstufe eine Abbildung des Quantums der durch ein Partikel emittierten Ladungen liefert, das mit dem Detektor interagiert hat.

[0027] Die Ladungsvorverstärkerstufe kann einen als Stromintegrator geschalteten diskreten oder integrierten Verstärker umfassen.

[0028] Die Differenzierstufe kann einen als Differenzierer geschalteten Operationsverstärker umfassen (im Englischen als "differentiator" bekannt).

[0029] Die Integratorstufe kann einen als Integrator geschalteten Operationsverstärker umfassen.

[0030] Der Detektorstrom wird durch Impulse gebildet und die Integratorstufe umfasst vorzugsweise Steuereinrichtungen der Integrationsdauer während Dauern, die im Wesentlichen gleich der Dauer jedes Impulses des Detektorstroms sind. Auf diese Weise passt sich die Integratorschaltung von selbst an den Detektorstrom an.

[0031] Die Steuereinrichtungen der Integrationsdauer können einen zwischen dem Integrator und dem Ausgang der Differenzierstufe geschalteten ersten Schalter, einen zweiten Schalter zu Nullrückstellung des Integrators, eine logische Schaltung zur Steuerung der Schalter sowie einen Komparator zum Aktivieren der logischen Schaltung in Abhängigkeit von Resultat eines Vergleichs zwischen dem Abbildungssignal des Detektorstroms und einem Schwellenwert umfassen.

[0032] Die vorliegende Erfindung betrifft auch eine Spektrometrikette, die – dem Partikelstrahlungsdetektor nachgeschaltet – eine derart gekennzeichnete Verarbeitungsschaltung umfasst.

[0033] Eine solche Spektrometrikette bewahrt eine gute Linearität über einen großen zu messenden Energiebereich.

[0034] Eine andere Aufgabe der Erfindung besteht darin, eine Spektrometrikette vorzuschlagen, deren ballistisches Defizit kompensiert wird und deren Zählrate verbessert ist.

[0035] Wieder eine andere Aufgabe der Erfindung besteht darin, eine Spektrometrikette vorzuschlagen, die ohne Modifizierung mit mehreren Detektormodellen arbeiten kann.

[0036] Die Spektrometrikette kann zudem eine Erfassungsschaltung des durch die Integratorstufe der Verarbeitungsschaltung gelieferten Signals umfassen, wobei diese Erfassungsschaltung einen Analog-Digital-Wandler, gefolgt von einem Speicher, umfassen.

[0037] Ein durch die logische Schaltung geliefertes Signal kann die Erfassungsdauer konditionieren.

[0038] Der Detektor kann mit einem Widerstand in eine Teilerbrückenschaltung integriert sein bzw. eine Teilerbrückenschaltung bilden.

[0039] Der Detektor ist vorteilhafterweise ein Halbleiterdetektor.

[0040] Das Halbleitermaterial kann aus der Gruppe gewählt werden, die CdZnTe, CdTe:Cl, CdTe:In umfasst.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0041] Die vorliegende Erfindung wird besser verständlich durch die Lektüre der Beschreibung von nur erläuternden und nicht einschränkenden Realisierungsbeispielen, bezogen auf die beigefügten Zeichnungen:

[0042] die [Fig. 1](#) (schon beschrieben) zeigt einen Schaltplan einer Spektrometrikette nach dem Stand der Technik;

[0043] die [Fig. 2](#) (schon beschrieben) zeigt Chronogramme, nämlich mit der Referenz A den durch den Detektor gelieferten Strom i_1 , mit der Referenz B die durch den Ladungsvorverstärker gelieferte Spannung v_1 und mit der Referenz C die durch das Impulsfilter der Spektrometrikette der [Fig. 1](#) gelieferte Spannung v_2 ;

[0044] die [Fig. 3](#) (schon beschrieben) zeigt Chronogramme, nämlich mit der Referenz A einen Impuls mit der Spannung v_2 und mit der Referenz B die Spannung v_3 , geliefert durch eine mit derjenigen der [Fig. 1](#) vergleichbare Spektrometrikette;

[0045] die [Fig. 4](#) ist ein Schaltplan einer erfindungsgemäßen Verarbeitungsschaltung und einer eine solche Verarbeitungsschaltung umfassenden Verarbeitungskette;

[0046] die [Fig. 5](#) zeigt Chronogramme, illustrierend: mit der Referenz A den durch die Verarbeitungsschaltung der [Fig. 4](#) empfangenen Detektorstrom I_1 , mit der Referenz B die am Ausgang der Ladungsvorverstärkerstufe vorhandene Spannung V_1 , mit der Referenz C die am Ausgang der Differenzierstufe vorhandene Spannung V_2 , mit der Referenz D die am Ausgang der Integratorstufe vorhandene Spannung V_3 , mit der Referenz E das durch den Komparator gelieferte Signal ACT und mit der Referenz F das der Erfassungsschaltung gelieferte Signal CLACQ;

[0047] die [Fig. 6](#) zeigt jeweils – mit den Referenzen A und B – Veränderungen der Spannung am Ausgang des Ladungsvorverstärkers und der Differenzierschaltung einer Verarbeitungsschaltung nach der Erfindung in der Testphase;

[0048] die [Fig. 7](#) zeigt den Verlauf des Bode-Diagramms des Hochpassfilters, gebildet durch die Differenzierstufe der erfindungsgemäßen Verarbeitungsschaltung;

[0049] die [Fig. 8](#) zeigt den Verlauf des Bode-Diagramms des Bandpassfilters, gebildet durch das durch die Differenzierstufe und die Integratorstufe der erfindungsgemäßen Verarbeitungsschaltung gebildete System;

[0050] die [Fig. 9](#) zeigt die Linearität einer erfindungsgemäßen Spektrometrikette.

[0051] Identische, ähnliche oder äquivalente Teile der verschiedenen nachfolgenden Figuren tragen dieselben Bezugszeichen, um den Übergang von einer Figur zur anderen zu erleichtern.

[0052] Um die Figuren besser lesbar zu machen, weisen die verschiedenen in den Figuren dargestellten Teile nicht notwendigerweise einen einheitlichen Maßstab auf.

DETAILLIERTE DARSTELLUNG SPEZIELLER REALISIERUNGSARTEN

[0053] Es wird nun Bezug auf die [Fig. 4](#) genommen, die einen Schaltplan einer erfindungsgemäßen Verarbeitungsschaltung zeigt, mit der eine Spektrometrikette nach der Erfindung ausgestattet ist. Wie nach dem Stand der Technik ist die Verarbeitungsschaltung dazu bestimmt, mit einem Detektor **21** zu kooperieren; sie umfasst drei aufeinanderfolgende Stufen **20**, **25**, **26**. Man geht davon aus, dass der Detektor **21** mit dem der [Fig. 1](#) vergleichbar ist und dass er (wieder) in eine einen Widerstand R_p umfassende Teilerbrückenschaltung **22** integriert ist, auf die aus Gründen der Vereinfachung nicht (mehr) eingegangen wird. Die Versorgungsschlüsse tragen jeweils die Referenzen **23**, **24**.

[0054] Die Stufe **20** ist ebenfalls mit derjenigen der [Fig. 1](#) vergleichbar. Es handelt sich um einen Ladungsvorverstärker. Er umfasst einen als Stromintegrator geschalteten diskreten oder integrierten Verstärker zum Beispiel vom Typ ASIC A'1. Ein Integrationsverstärker C'1 ist zwischen dem Eingang und dem Ausgang des Vorverstärkers A'1 geschaltet. Dieser Letztere hat einen Eingang, der durch einen Kondensator C'2 mit dem gemeinsamen Punkt des Spannungsteilers **22** verbunden ist. Der Ladungsvorverstärker erhält folglich einen Strom I_1 (Detektorstrom genannt), geliefert durch den Detektor **21**, wenn Partikel mit ihm interagieren. Er liefert ein Signal wie folgt:

$$V_1(t) = -\frac{1}{C_1} \int I_1(t) dt = -Q'/C_1 \quad (1)$$

[0055] Q' ist das Ladungsquantum, emittiert durch ein Partikel, das mit dem Detektor **21** interagiert hat.

[0056] Der wesentliche Unterschied in Bezug auf die Spektrometrikette nach dem Stand der Technik besteht darin, dass die nachfolgende Stufe **25** nicht mehr durch ein Impulsfilter gebildet wird, sondern durch einen Differenzierer. Auf konventionelle Weise umfasst dieser Differenzierer einen Operationsverstärker A' mit einem zwischen seinem Eingang und seinem Ausgang geschalteten Widerstand R' . Der Eingang des Operationsverstärkers ist mit dem Ausgang der Ladungsvorverstärkerstufe **20** durch einen Kondensator C' verbunden. Der Differenzierer **25** realisiert die mathematische Ableitungsfunktion in Bezug auf das zeitabhängige Signal $V_1(t)$

am Ausgang der Vorverstärkerstufe **20**. Die Differenzierstufe **25** liefert eine Spannung $V_2(t)$ wie:

$$V_2(t) = R'C'dV_1(t)/dt \quad (2)$$

[0057] Durch Kombination der Ausdrücke (1) und (2) erhält man folgenden Ausdruck der Spannung am Ausgang der Differenzierstufe:

$$V_2(t) = \frac{R'C'}{C'1} I_1(t) \quad (3)$$

[0058] Das Signal $V_2(t)$ ist ein dem Detektorstrom $I_1(t)$ proportionales Signal, Abbildungssignal des Detektorstroms $I_1(t)$ genannt.

[0059] Die [Fig. 5](#) zeigt mit den Referenzen A, B und C Chronogramme der Signale I_1 , V_1 und V_2 , die jeweils der Detektorstrom, die Spannung am Ausgang der Vorverstärkerstufe und die Spannung am Ausgang der Differenzierstufe sind. Das Signal $V_2(t)$ ist ein Impulssignal, dessen Dauer enthalten ist zwischen den Zeitpunkten $t'0$ und $t'1$, was im Wesentlichen der Dauer der Impulse des Detektorstroms entspricht. Das Signal $V_2(t)$ entspricht der mathematischen Ableitung des Signals $V_1(t)$. Es hat folglich ein positives Vorzeichen für die Anstiegsflanken von $V_1(t)$ und ein negatives Vorzeichen für die Abfallflanken.

[0060] Das Verstärkungsverhältnis

$$\frac{R'C'}{C'1}$$

wird so groß wie möglich gewählt. In dem in der Folge entwickelten Beispiel wird das Verstärkungsverhältnis gleich $10^7 \Omega$ gewählt.

[0061] Man konfiguriert den aktiven Teil des Differenzierers (das heißt seinen Operationsverstärker A') so, dass er ausreichend schnell ist und ein Signal V_2 mit schnellen Flanken liefert, um die zeitliche Information des Detektorstroms I_1 möglichst getreu wiederzugeben.

[0062] Die Differenzierstufe **25** ist eine Stufe, die praktisch kein Geräusch verursacht. Zurückgeleitet zu ihrem Eingang ist das Eigengeräusch der Differenzierstufe **25** deutlich geringer als das durch die erste Stufe **20** des Ladungsvorverstärkers eingebrachte Geräusch. Es kann typisch niedriger sein als 1 % des durch den Ladungsvorverstärker eingebrachten Geräusches. Beispielartig zeigt die [Fig. 6](#) den Verlauf des Signals V_1 (Kurve A) und V_2 (Kurve B) aufgrund von Messungen mit einer erfindungsgemäßen Spektrometrikette: die Impulse, praktisch unsichtbar in der Kurve A, sind in der Kurve B sehr gut zu sehen. V_2 ist eine Abbildung des Stroms I_1 .

[0063] Die Differenzierstufe **25** verhält sich wie ein Hochpassfilter. Die [Fig. 7](#) zeigt das Bode-Diagramm einer solchen Stufe mit einer gewählten Zeitkonstante $R'C'$ gleich einer Mikrosekunde.

[0064] Das Niederfrequenzgeräusch (1/F-Geräusch) wird gedämpft, aber nicht das Hochfrequenzgeräusch, da der Differenzierer nur den Hochpassteil eines Bandpassfilters bildet.

[0065] Die dritte Stufe **26** ist eine Integratorstufe, die durch Umschaltung gesteuert wird und die die mathematische Integralfunktion realisiert. Im Unterschied zu der Verarbeitungsschaltung nach dem Stand der Technik, realisiert die erfindungsgemäße Verarbeitungsschaltung sehr wohl eine Integration und nicht nur eine Detektion der Amplitude der Impulse am Ausgang des Impulsfilters: man erhält eine Spannung V_3 als Abbildung des durch den Detektor gelieferten Ladungsquantums.

[0066] Die Integratorstufe **26** umfasst einen Operationsverstärker-Integrator $A'2$ mit einem parallelgeschalteten Integrationskondensator $C'3$, zwischen seinem Eingang und seinem Ausgang. Sein Eingang ist durch einen Widerstand $R'3$ mit dem Ausgang der Differenzierstufe **25** verbunden. Der Integrator kann durch Umschaltung gesteuert werden. Ein erster Schalter $SW'1$ ist zwischen dem Ausgang der Differenzierstufe **25** und dem Widerstand $R'3$ vorgesehen und ein zweite Schalter $SW'2$ ist parallelgeschaltet zu dem Integrationskondensator $C'3$. Der erste Schalter $SW'1$ steuert die Integrationsfunktion und der zweite Schalter $SW'2$ steuert die Nullrückstellung des Integrators. Nach der Verarbeitung von Informationen bezüglich der Interaktion eines Partikels wird der Integrator wieder auf Null gestellt, ehe er die Informationen von einem anderen Partikel verarbeitet.

[0067] Die Schalter SW'1 und SW'2 werden durch eine logische Schaltung **28** gesteuert, die durch ein Signal ACT aktiviert wird, das am Ausgang eines Komparators **29** erscheint, wobei dieser Komparator dazu bestimmt ist, das Signal V2, vorhanden am Ausgang der Differenzierstufe, mit einem Schwellenwert s' zu vergleichen, wobei dieser Schwellenwert höher sein muss als die Geräuschspannung von V2.

[0068] Man erinnert, dass das Signal V2 ein Abbildungssignal des Detektorstroms I1 ist. In der [Fig. 5](#) zeigt die Referenz A den Verlauf des Detektorstroms I1, die Referenz B den Verlauf des Signals V1 am Ausgang der Vorverstärkerstufe, die Referenz C den Verlauf des Signals V2 am Ausgang der Differenzierstufe und die Referenz D den Verlauf des Signals V3 am Ausgang der Integratorstufe.

[0069] Vor dem Zeitpunkt $t'0$ ist das Signal niedriger als der Schwellenwert s' , der erste Schalter SW'1 ist offen und der zweite Schalter SW'2 ist geschlossen. Das Signal V3 am Ausgang des Integrators ist auf Niederpegel. Der Komparator **29** liefert ein Aktivierungssignal ACT des Integrators. Vor dem Zeitpunkt $t'0$ ist das Signal ACT auf Niederpegel. Dieses Signal hat in der [Fig. 5](#) die Referenz E.

[0070] Zum Zeitpunkt $t'0$ überschreitet das Signal den Schwellenwert s' , das Signal ACT am Ausgang des Komparators **29** geht auf Hochpegel, aktiviert die logische Schaltung **28**, die die Schließung des ersten Schalters SW'1 und die Öffnung des zweiten Schalters SW'2 steuert.

[0071] Der Integrator beginnt zu integrieren und liefert ein Signal V3:

$$V3(t) = - \frac{1}{R'3C'3} \int V2(t) dt \quad (4)$$

[0072] Indem man die Ausdrücke (3) und (4) kombiniert, erhält man:

$$V3(t) = - \frac{R'C'}{R'3C'3C'1} \int I1(t) dt \quad (5)$$

[0073] Indem man die Ausdrücke (5) und (1) kombiniert, erhält man:

$$V3(t) = - \frac{R'C'}{R'3C'3C'1} Q' \quad (6)$$

[0074] Das Signal V3(t), geliefert durch die Differenzierstufe, ist proportional zum Ladungsquantum eines interagierenden Partikels und folglich zur Energie des Partikels.

[0075] Zum Zeitpunkt $t'1$ fällt das Signal V2 unter den Schwellenwert s' ab, wird der erste Schalter SW'1 geöffnet und der zweite Schalter SW'2 bleibt im offenen Zustand. Das Signal

$$V3(t) = - \frac{R'C'}{R'3C'3C'1} \int I1(t) dt$$

wird in einem Speicher **27.1** einer Erfassungsstufe **27** der erfindungsgemäßen Spektrometrikette gespeichert, wobei diese Erfassungsstufe am Ausgang der Integrationsstufe **26** angeschlossen ist. Das Signal V3 wird vorher durch einen Analog-Digital-Wandler **27.2** digitalisiert, der sich in der Erfassungsstufe **27** befindet. Die Dauer, während der die Erfassung stattfindet, wird durch ein Impulssignal CLACQ gesteuert, das die logische Schaltung **28** zum Zeitpunkt $t'1$ liefert und deren Dauer ($t'2 - t'1$) ausreicht, um eine korrekte Erfassung durchzuführen. Das Signal CLACQ hat in der [Fig. 5](#) die Referenz F. Dieses Signal weist zum Zeitpunkt $t'1$ eine Anstiegsflanke auf.

[0076] Wenn diese Dauer abgelaufen ist, das heißt zum Zeitpunkt $t'2$, weist das Signal CLACQ eine Abfallflanke auf. Der Integrator wird wieder auf Null gestellt und das Signal V3 geht auf Niederpegel. Der Integrator ist bereit, ein von einem anderen Partikel stammendes Signal zu verarbeiten. Der Integrator arbeitet nur während einer Dauer im Wesentlichen gleich der Dauer T_m der Impulse des Detektorstroms I1. Anders gesagt findet die Integration nur während der Lebensdauer der Impulse des Detektorstroms I1 statt.

[0077] Das System aus Differenzierstufe und Integratorstufe bildet ein Tiefpassfilter. Was aber sehr interessant bzw. vorteilhaft ist, ist die Tatsache, dass die Zeitkonstanten des Tiefpassfilters in Abhängigkeit von der Form des Detektorstroms I1 autoadaptiv sind. Dieser Vorteil wird aufgrund der Tatsache erzielt, dass die Integration im Wesentlichen nur während der Dauer T_m der Impulse des Detektorstroms I1 stattfindet.

[0078] Die [Fig. 8](#) zeigt das Bode-Diagramm von zwei Tiefpassfiltern von erfindungsgemäßen Verarbeitungsschaltungen. Die Mittenfrequenz des Filters wird ausgedrückt durch $f_c = 0,44/T_m$, seine Verstärkung durch $G_{dc} = T_m/R^3C^3$ und die Verarbeitungszeit eines Partikels, im vorliegenden Fall eines Photons, beträgt $1.5 \mu s$ einschließlich der Nullrückstellung.

[0079] Die Kurve A wurde mit $T_m = 0,1 \mu s$ realisiert und die Kurve B für $T_m = 0,1 \mu s$. Für jedes Partikel, egal wo es mit dem Detektor interagiert, stellt die Dauer T_m des Detektorstroms I1 oder die Anstiegszeit am Ausgang des Vorverstärkers die Mittenfrequenz f_c des Tiefpassfilters ein, was die Einhaltung eines optimalen Rauschabstands ermöglicht. Eine solche Verarbeitungsschaltung ist autoadaptiv gegenüber dem Detektor, mit dem sie in der Spektrometrikette kooperiert. Sie passt sich an den Detektor an, unabhängig von seiner Dicke, ohne irgend eine Einstellung irgend eines äußeren Parameters.

[0080] Die Kurven der [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) wurden mit einem erfindungsgemäßen Spektrometriketten-Prototyp in der Form einer Monokanalsonde aufgezeichnet, dazu bestimmt, den Abbrand von bestrahlten Brennelementen zu bestimmen, indem man simultan Cäsium 137 und Europium 154 misst. Eine solche Sonde kann spektrometrische Messungen zwischen 100 keV und 2 MeV durchführen. Der Detektor ist ein CdZnTe-Stabdetektor mit einer Dicke von 1 cm. Es wurde eine Cäsium-137-Partikelquelle benutzt. Die Kurve der [Fig. 9](#) zeigt die Veränderung der Anzahl der durch die Sonde im gesamten Spektrum detektierten Stöße (das heißt Partikel) NCD pro Sekunde in Abhängigkeit von der Anzahl der von der Quelle emittierten und beim Detektor ankommenden Partikel pro Sekunde NCR. Die Spektrometrikette besitzt eine gute Linearität bis ungefähr $1,5 \cdot 10^6$ Stöße/s. Jenseits davon nimmt die Zahl der detektierten Stöße/s ab, während die Zahl der beim Detektor eintreffenden Partikel/s weiter zunimmt.

[0081] In Bezug auf die Leistungen der konventionellen Spektrometriketten mit hoher Zählrate, zum Beispiel des Typs EG&G973U (Referenz einer den Spezialisten gut bekannten Kette: aufgeführt im Katalog des Herstellers ORTEC) mit einem Germaniumdetektor, ist die erzielte Zählrate fünfmal höher, und dies mit einem dicken Detektor, bei dem die Durchgangszeit der Partikel ungefähr $1 \mu s$ beträgt, was sehr viel ungünstiger ist als der Germaniumdetektor.

[0082] Es wurde eine bestimmte Realisierungsart der vorliegenden Erfindung dargestellt und detailliert beschrieben. Selbstverständlich können verschiedene Veränderungen und Modifikationen vorgenommen werden, ohne den Rahmen der Erfindung zu verlassen.

IN DER BESCHREIBUNG GENANNT REFERENZEN

[0083] Diese Liste von durch den Anmelder genannten Referenzen dient nur dazu, dem Leser zu helfen und ist nicht Teil der europäischen Patentschrift. Obwohl sie mit einem Höchstmaß an Sorgfalt erstellt worden ist, können Fehler oder Weglassungen nicht ausgeschlossen werden und das EPA lehnt in dieser Hinsicht jede Verantwortung ab.

In der Beschreibung genannte Patentschriften

- US 4727256 A [0022]

Patentansprüche

1. Verarbeitungsschaltung einer einen Partikelstrahlungsdetektors (21) umfassenden Spektrometrie-Kette, mit einer Ladungsvorverstärkerstufe (20), die von dem Detektor einen gepulsten Strom (I1) erhält, der repräsentativ ist für die von einem mit dem Detektor interagierenden Partikel emittierte Ladungsmenge, einer Integrierstufe (26) und einer mit der Ladungsvorverstärkerstufe (20) verbundenen Differenzierstufe (25), wobei die Differenzierstufe (25) geeignet ist zum Empfangen eines von der Ladungsvorverstärkerstufe (20) stammenden Signals (V1) und geeignet ist zum Liefern eines Bildsignals (V2) des Detektorstroms (I1) an die Integrierstufe (26), und die Integrierstufe (26) geeignet ist zum Liefern eines Bilds (V3) von der durch ein mit dem Detektor interagierendes Partikel emittierten Ladungsmenge, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Integrierstufe (26) durch ein Integrierglied gebildet wird, das geeignet ist, mit Einrichtungen (28, 29, SW'1, SW'2) zum Steuern der Integrationsdauer während Dauern im Wesentlichen gleich der Dauer jedes Impulses des Detektorstroms zu kooperieren, wobei die Differenzierstufe (25) direkt mit der durch das Integrierglied und die Steuereinrichtungen der Integrationsdauer gebildeten Gruppe verbunden ist und die Differenzierstufe (25) und die Gruppe ein Tiefpassfilter mit in Abhängigkeit von dem Detektorstrom selbstanpassenden Zeitkonstanten bildet.

2. Verarbeitungsschaltung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Ladungsvorverstärkerstufe (20) einen als Stromintegrierglied geschalteten diskreten oder integrierten Verstärker (A'1) umfasst.
3. Verarbeitungsschaltung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Differenzierstufe (25) einen als Differenzierglied geschalteten Operationsverstärker (A') umfasst.
4. Verarbeitungsschaltung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Integrierstufe (26) einen als Integrierglied geschalteten Operationsverstärker (A'2) umfasst.
5. Verarbeitungsschaltung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtungen zum Steuern der Dauer der Integration einen zwischen dem Integrierglied und dem Ausgang der Differenzierstufe (25) eingefügten ersten Schalter (SW'1), einen zweiten Schalter (SW'2) zur Nullung des Integrierglieds, eine logische Schaltung (28) zum Steuern des Schalters und einen Komparator (29) zum Aktivieren der logischen Schaltung (28) in Abhängigkeit von dem Resultat eines Vergleichs zwischen dem Bildsignal des Detektionsstroms (V2) und einer Schwelle (s') umfasst.
6. Spektrometrie-Kette mit einem Partikelstrahlungsdetektor (21), dadurch gekennzeichnet, dass dem Detektor (21) eine Verarbeitungsschaltung nach einem der Ansprüche 1 bis 5 nachgeschaltet ist.
7. Spektrometrie-Kette nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass sie eine Erfassungsschaltung (27) des durch die Integrierstufe (26) der Verarbeitungsschaltung gelieferten Signals (V3) umfasst, wobei diese Erfassungsschaltung (27) einen Analog-Digital-Wandler (27.2) umfasst, gefolgt von einem Speicher (27.1).
8. Spektrometrie-Kette nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass ein durch die logische Schaltung (28) geliefertes Signal (ACT) die Erfassungsdauer konditioniert.
9. Spektrometrie-Kette nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor (21) und ein Widerstand (R'p) als Teilerbrücke geschaltet sind.
10. Spektrometrie-Kette nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor (21) ein Halbleiterdetektor ist.
11. Spektrometrie-Kette nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Halbleitermaterial ausgewählt wird aus der CdZnTe, CdTe:Cl, CdTe:In enthaltenden Gruppe.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

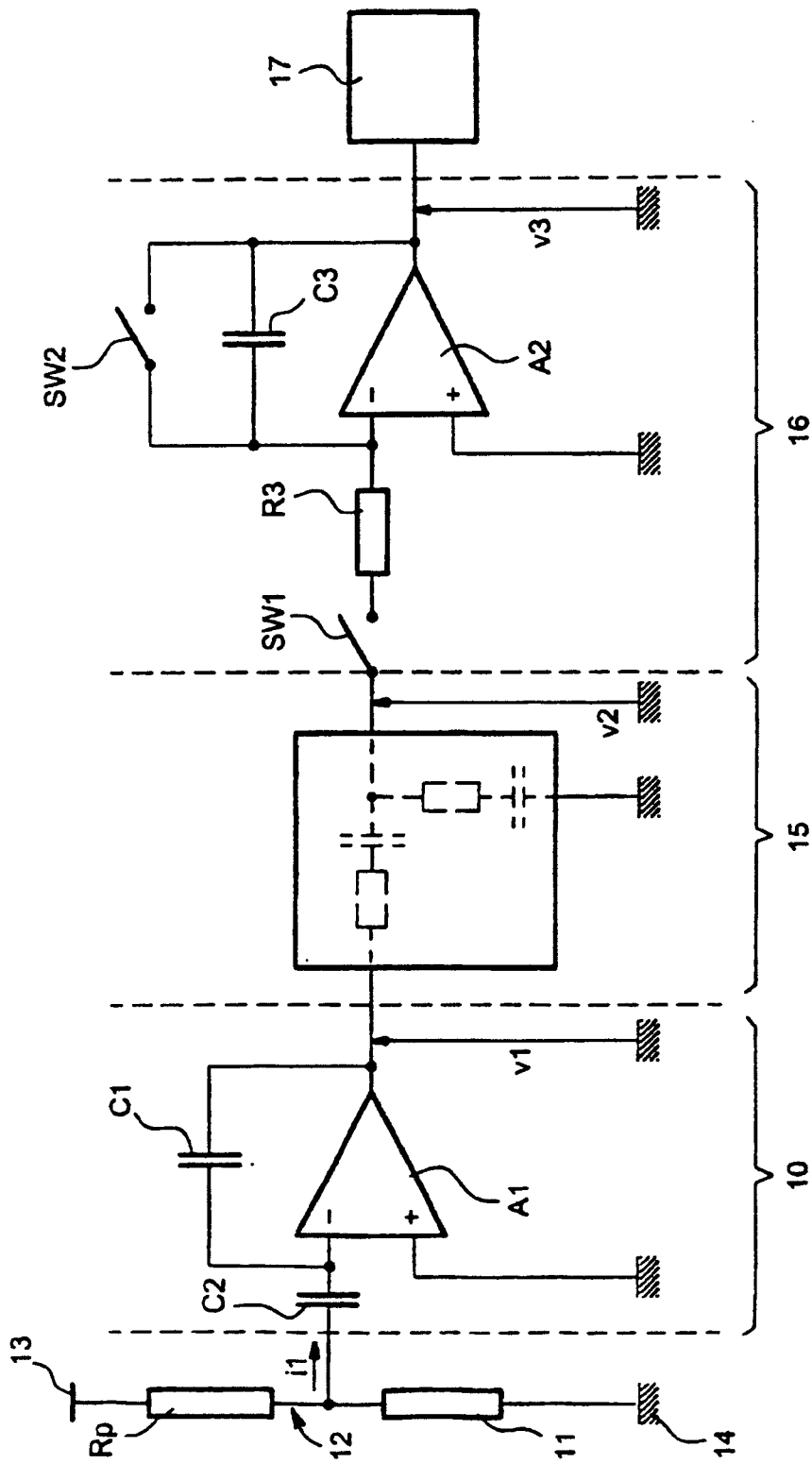


FIG. 1

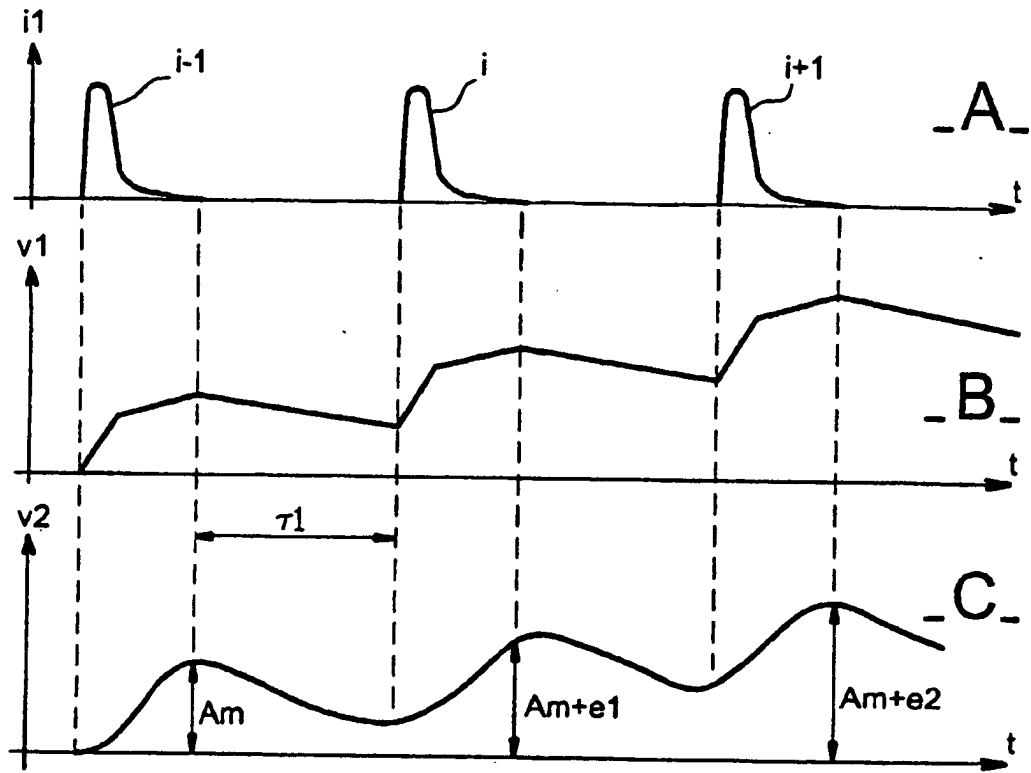


FIG. 2

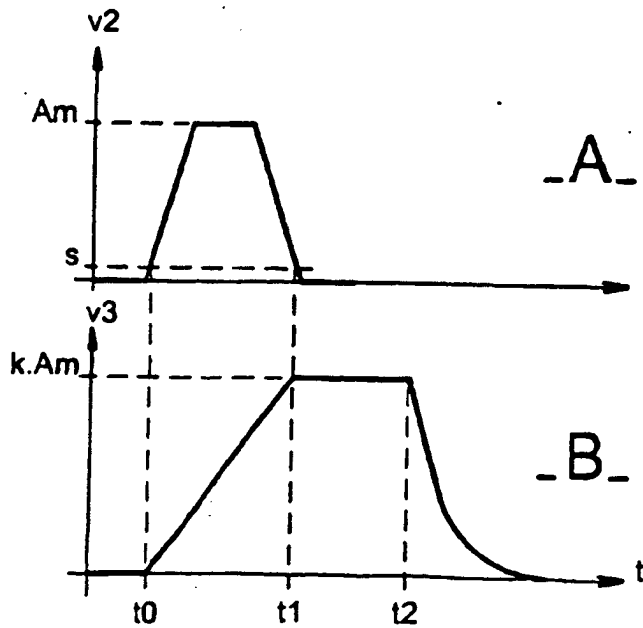


FIG. 3

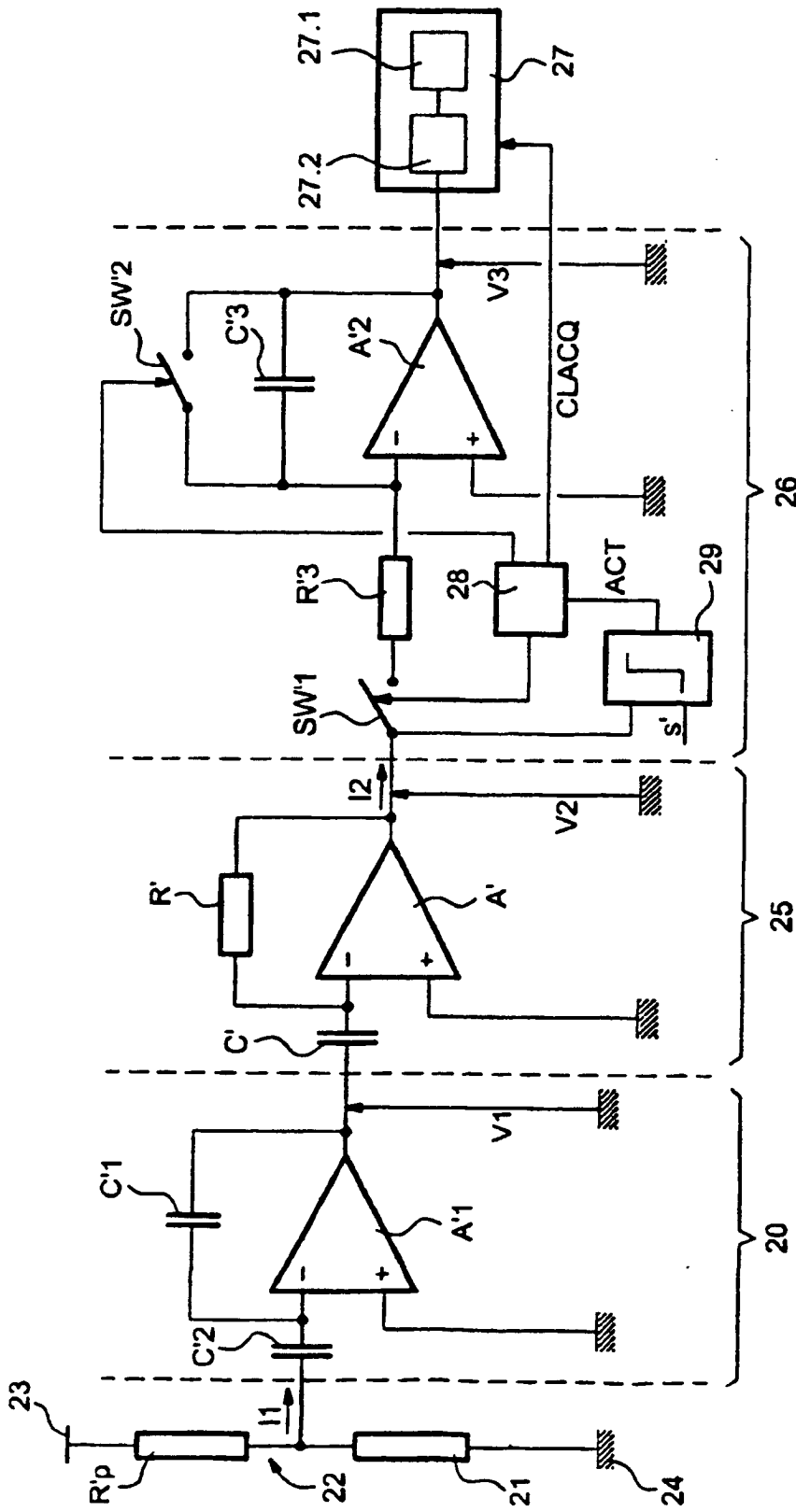


FIG. 4

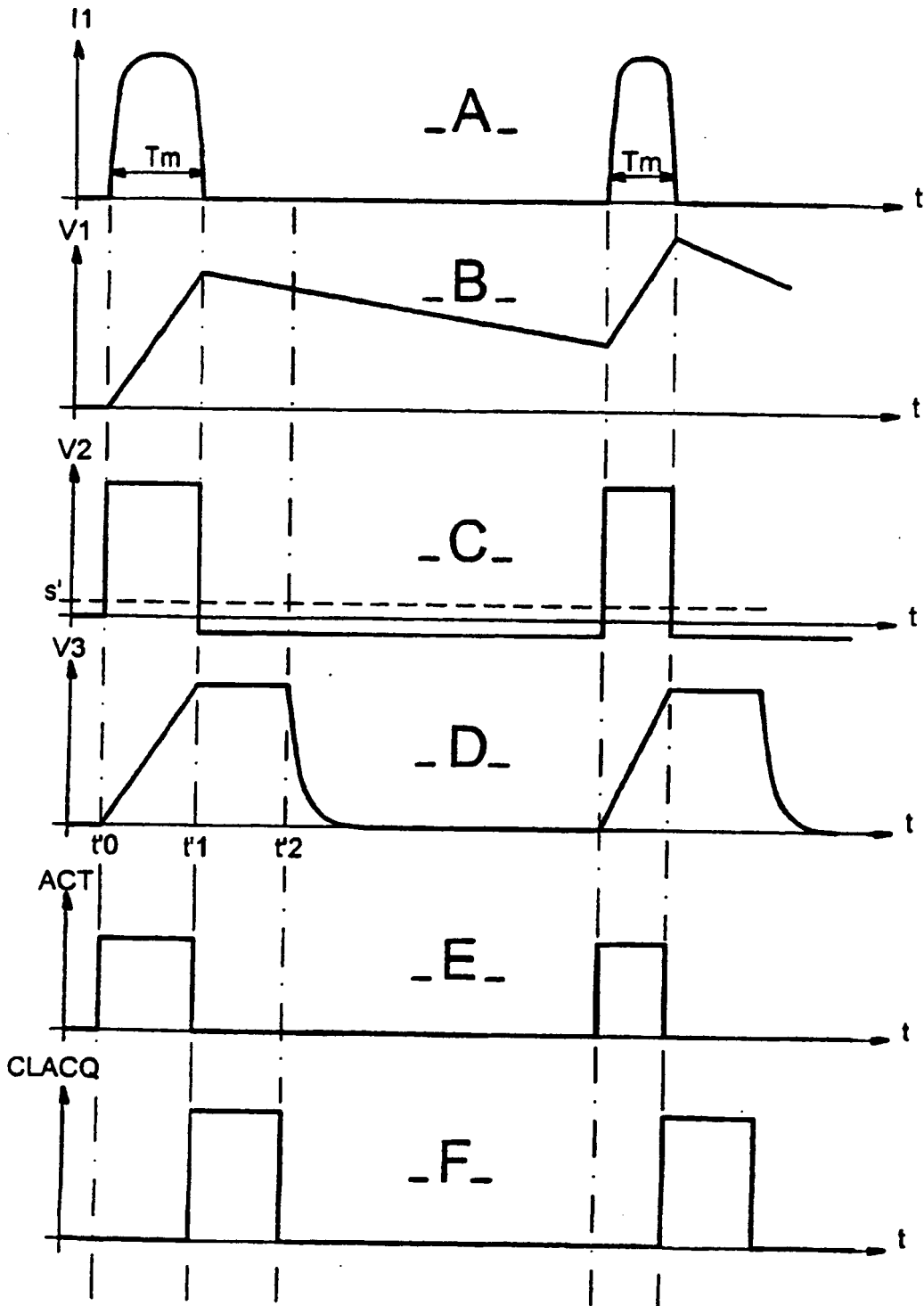


FIG. 5

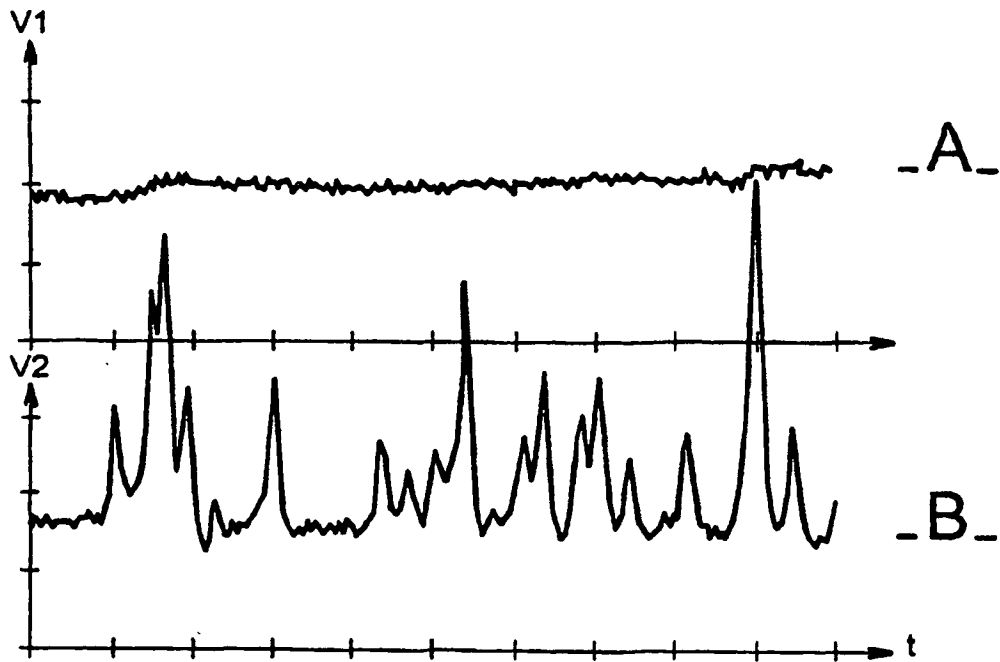


FIG. 6

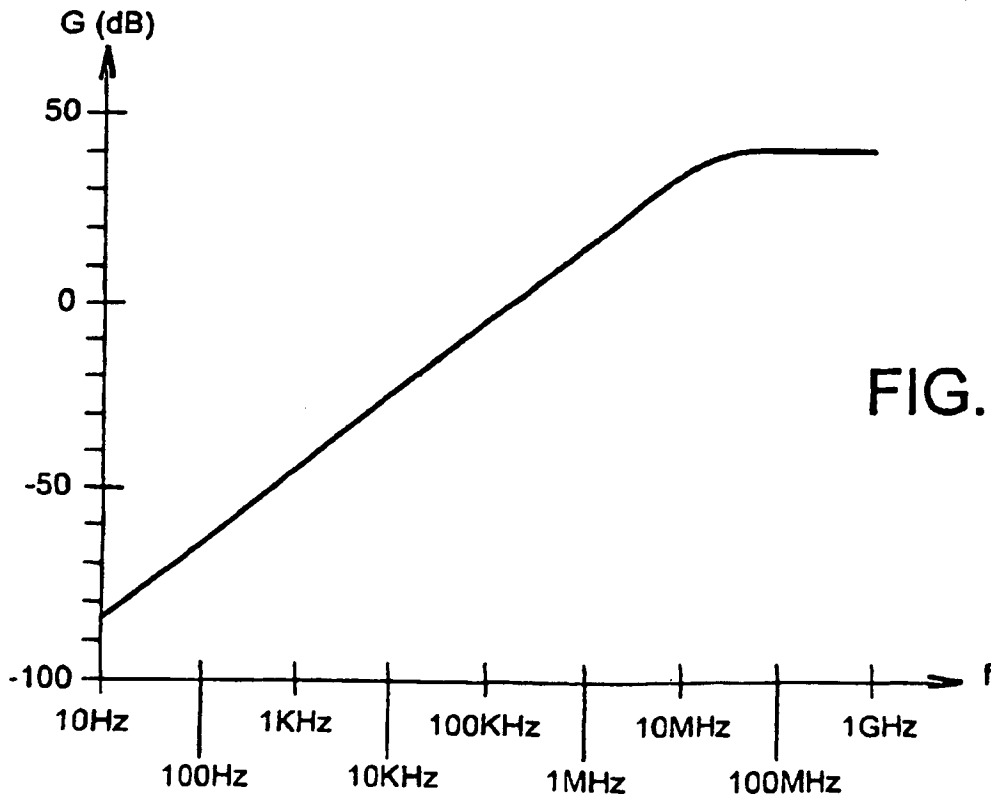


FIG. 7

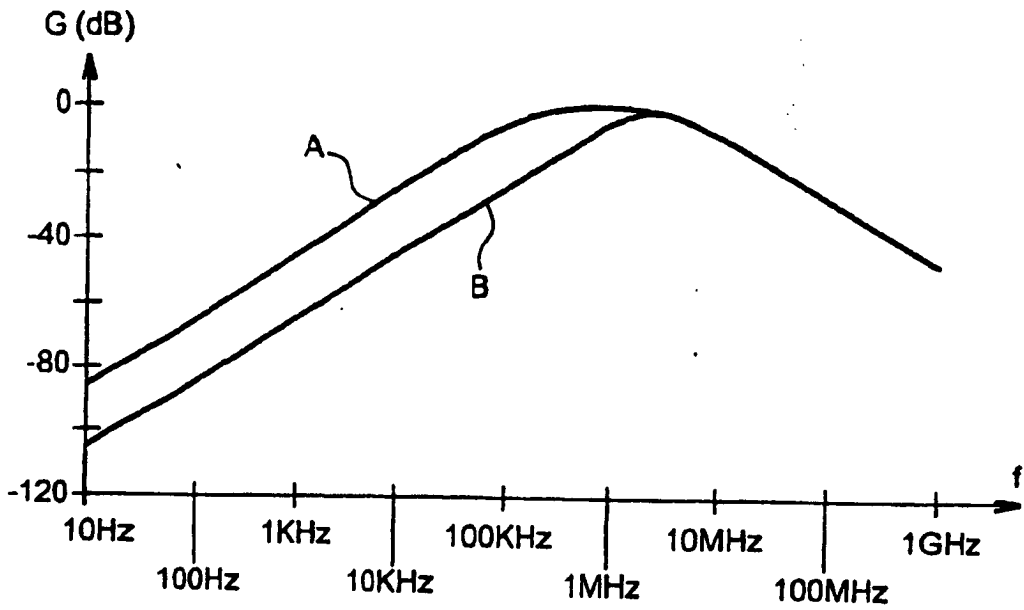


FIG. 8

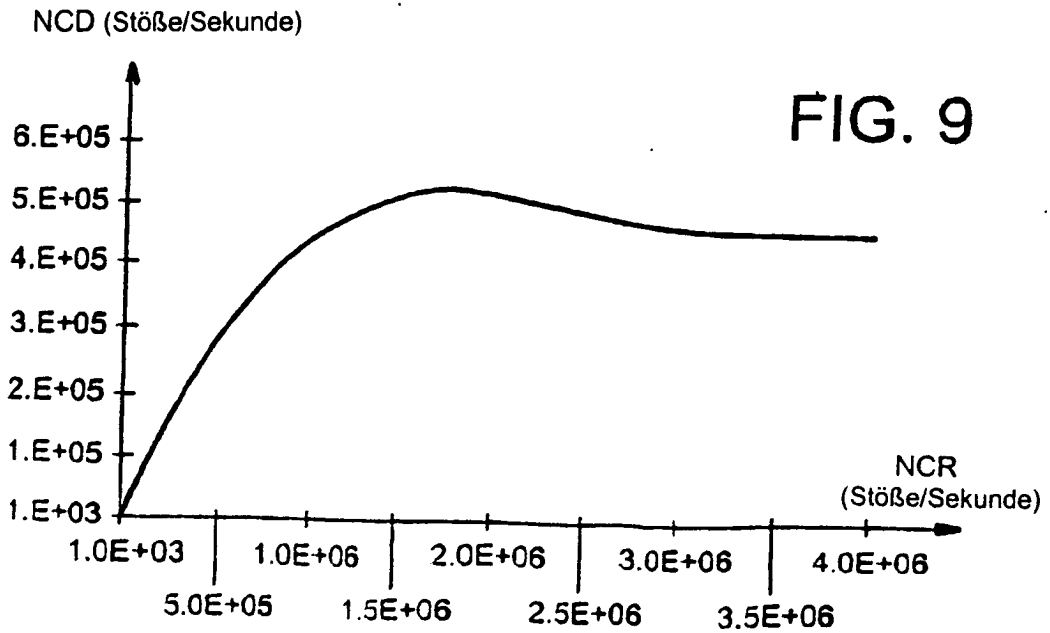


FIG. 9