

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7217528号
(P7217528)

(45)発行日 令和5年2月3日(2023.2.3)

(24)登録日 令和5年1月26日(2023.1.26)

(51)国際特許分類		F I		
G 0 1 T	1/24 (2006.01)	G 0 1 T	1/24	
G 0 1 T	1/17 (2006.01)	G 0 1 T	1/17	B
		G 0 1 T	1/17	A

請求項の数 10 (全19頁)

(21)出願番号	特願2019-193745(P2019-193745)	(73)特許権者	000250339 株式会社リガク 東京都昭島市松原町3丁目9番12号
(22)出願日	令和1年10月24日(2019.10.24)	(74)代理人	100114258 弁理士 福地 武雄
(65)公開番号	特開2021-67577(P2021-67577A)	(74)代理人	100125391 弁理士 白川 洋一
(43)公開日	令和3年4月30日(2021.4.30)	(74)代理人	100208605 弁理士 早川 龍一
審査請求日	令和3年11月10日(2021.11.10)	(72)発明者	小林 信太郎 東京都昭島市松原町3丁目9番12号 株式会社リガク内
		(72)発明者	中江 保一 東京都昭島市松原町3丁目9番12号 株式会社リガク内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 処理装置、システム、X線測定方法およびプログラム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

フォトン・カウンティング型の半導体検出器により、入射X線のパルス信号をカウントして読み出された出力値を記憶する記憶部と、

前記読み出された出力値に基づいて計数値を算出する算出部と、を備え、

前記算出部は、露光に対するパルス検出率の増加に対し、前記パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルを用いることを特徴とする処理装置。

【請求項2】

前記パルス検出率は、前記露光に対し前記パルス信号が検出された合計時間と前記露光の合計時間との比に相当することを特徴とする請求項1記載の処理装置。

【請求項3】

前記見かけ上の時定数は、前記パルス検出率がゼロである場合に本来の時定数であることを特徴とする請求項1または請求項2記載の処理装置。

【請求項4】

前記見かけ上の時定数は、前記パルス検出率が1である場合に本来の時定数と1より小さい定数との積であることを特徴とする請求項1から請求項3のいずれかに記載の処理装置。

【請求項5】

前記記憶部は、前記パルス信号の時定数を記憶し、

前記算出部は、前記モデルを用いる際に、前記記憶された時定数を読み出して利用する

ことを特徴とする請求項 1 から請求項 4 のいずれかに記載の処理装置。

【請求項 6】

前記半導体検出器と、
請求項 1 から請求項 5 のいずれかに記載の処理装置と、を備えることを特徴とするシステム。

【請求項 7】

前記半導体検出器が、前記パルス信号の時定数より短い時間で露光することを特徴とする請求項 6 記載のシステム。

【請求項 8】

前記計数値の算出では、前記パルス信号の時定数と前記露光の単位時間とを足した時間で前記パルス信号をカウントしたものとして、前記計数値を補正することを特徴とする請求項 7 記載のシステム。

10

【請求項 9】

フォトン・カウンティング型の半導体検出器により、入射 X 線のパルス信号をカウントし出力値を読み出すステップと、

前記読み出された出力値に基づいて計数値を算出するステップと、を含み、
前記計数値の算出では、露光に対するパルス検出率の増加に対し、前記パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルを用いることを特徴とする X 線測定方法。

【請求項 10】

フォトン・カウンティング型の半導体検出器により、入射 X 線のパルス信号をカウントし出力値を読み出す処理と、

前記読み出された出力値に基づいて計数値を算出する処理と、をコンピュータに実行させ、

20

前記計数値の算出処理では、露光に対するパルス検出率の増加に対し、前記パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルを用いることを特徴とするプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、フォトン・カウンティング型の半導体検出器による処理装置、システム、X 線測定方法およびプログラムに関する。

30

【背景技術】

【0002】

放射線測定に用いられるフォトン・カウンティング型の半導体検出器は、所定の時間に検出されたパルス信号の強度が閾値を超えた回数をパルス信号の個数として計数することにより、X 線の強度を測定する。しかしながら、パルス信号の強度が閾値を超えている状態で次のパルス信号が発生すると、そのパルス信号を計数することができず、数え落としが生じる。X 線の強度が強すぎる場合、数え落としが頻発し、その結果、測定された X 線の強度が、実際の X 線の強度よりも低く見積もられてしまう。

【0003】

このような数え落としの影響を減らす方法として、測定した計数値を補正する方法が検討されている（例えば特許文献 1）。また、測定時に計数値が真のカウントに近くなるようにパルスを計数する方法も考えられる（例えば特許文献 2）。

40

【0004】

特許文献 1 は、放射線検出器 1 により出力されたアナログパルス信号が所定の条件を満たす場合にデジタルパルス信号を出力する波高弁別器 3 とシグナルチャンネル波高分析器 4 を備える放射線測定装置が開示されている。特許文献 1 記載の放射線測定装置は、第 1 のカウンタ 5 と第 2 のカウンタ 6 のそれぞれから出力されたデジタルパルス信号を計数し、計数値 M、P を出力し、演算器 7 は、計数値 M、P から得られる計数率 m、p に対して、メモリ 8 に格納された数え落とし補正テーブル 8 1、8 2 を参照して数え落とし補正および誤計数補正を行っている。補正テーブルは、実験的に発生させた擬似信号パルスでダ

50

ブルパルス近接させてパイルアップの分解時間 t_1 、および誤計数が発生する近接時間 t_2 を求めて、1次補正計数率 n および2次補正計数率 $(n - q)$ を求めている。

【0005】

特許文献2は、検出器アレイのセル内に調整可能な不感時間を備えた即時リトリガ能力を適用することによって改善された高率計数性能を備えた光子計数イメージングのための方法および装置が開示されている。すなわち、特許文献2記載の方法および装置は、信号パルスが最初に閾値を上回ったあと閾値を上回る限り、その信号パルスの閾値を上回っている時間に含まれる所定の幅の不感時間間隔の数を計数し、それを、その信号パルスの閾値を上回っている時間に到着した光子の数とみなすことで、数え落としの影響を低減している。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【文献】特開2012-013563号公報

特表2014-527162号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、特許文献1の放射線測定装置は、補正テーブルが、実験的に発生させた擬似信号パルスでダブルパルス近接させてパイルアップの分解時間 t_1 、および誤計数が発生する近接時間 t_2 を求めて補正しているため、3つ以上のパルスの近接が頻発する程度まで計数率が上昇したときに、補正の精度が十分でなくなる。また、特許文献2の方法は、計数率の上昇に対して不感時間が一定であるため、計数率の上昇に伴い、補正の精度が十分でなくなる。

20

【0008】

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであり、従来の方法でカバーできなかった高い計数率に対しても数え落としの影響を減殺できる処理装置、システム、X線測定方法およびプログラムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

(1) 上記の目的を達成するため、本発明の処理装置は、フォトン・カウンティング型の半導体検出器により、入射X線のパルス信号をカウントして読み出された出力値を記憶する記憶部と、前記読み出された出力値に基づいて計数値を算出する算出部と、を備え、前記算出部は、露光に対するパルス検出率の増加に対し、前記パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルを用いることを特徴としている。

30

【0010】

このようなパルス検出率の増加に対しパルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルでは、どれだけ高い計数率であっても対応する見かけ上の時定数が得られる。その結果、従来の方法でカバーできなかった高い計数率に対しても数え落としの影響を減殺できる。

40

【0011】

(2) また、本発明の処理装置において、前記パルス検出率は、前記露光に対し前記パルス信号が検出された合計時間と前記露光の合計時間との比に相当することを特徴としている。これにより、短い周期で短い単位時間で露光できる検出器を用いて容易にパルス検出率を算出できる。

【0012】

(3) また、本発明の処理装置において、前記見かけ上の時定数は、前記パルス検出率がゼロである場合に本来の時定数であることを特徴としている。これにより、モデル上で露光に対するパルスの重複がない場合には数え落としへの影響がなく、モデルが現実に即したものとなる。

50

【 0 0 1 3 】

(4) また、本発明の処理装置において、前記見かけ上の時定数は、前記パルス検出率が 1 である場合に本来の時定数と 1 より小さい定数との積であることを特徴としている。これにより、モデル上は計測可能な最大の出力値に対しても計数を算出できる。

【 0 0 1 4 】

(5) また、本発明の処理装置において、前記記憶部は、前記パルス信号の時定数を記憶し、前記算出部は、前記モデルを用いる際に、前記記憶された時定数を読み出して利用することを特徴としている。これにより、計数値の算出の際に時定数を読み出し利用することができる。

【 0 0 1 5 】

(6) また、本発明のシステムは、前記半導体検出器と、上記 (1) から (5) のいずれかに記載の処理装置と、を備えることを特徴としている。これにより、半導体検出器から得られる出力値を用いて処理装置で計数値を算出できる。

【 0 0 1 6 】

(7) また、本発明のシステムにおいて、前記半導体検出器が、前記パルス信号の時定数より短い時間で露光することを特徴としている。これにより、高い時間分解能で、物理現象を観察できる。また、一回の露光で 3 以上のパルスを検出することがなくなり、読み出しの負担が軽減される。また、出力値の読み出しは、2 ビットのモードで十分となり、読み出し時間を短縮できる。

【 0 0 1 7 】

(8) また、本発明の処理装置において、前記計数値の算出では、前記パルス信号の時定数と前記露光の単位時間とを足した時間で前記パルス信号をカウントしたものと、前記計数値を補正することを特徴としている。これにより、実質的な露光時間で検出された計数値を得ることができる。

【 0 0 1 8 】

(9) また、本発明の X 線測定方法は、フォトン・カウンティング型の半導体検出器により、入射 X 線のパルス信号をカウントし出力値を読み出すステップと、前記読み出された出力値に基づいて計数値を算出するステップと、を含み、前記計数値の算出では、露光に対するパルス検出率の増加に対し、前記パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルを用いることを特徴としている。これにより、高い計数率に対しても数え落としの影響を減殺できる。

【 0 0 1 9 】

(1 0) また、本発明のプログラムは、フォトン・カウンティング型の半導体検出器により、入射 X 線のパルス信号をカウントし出力値を読み出す処理と、前記読み出された出力値に基づいて計数値を算出する処理と、をコンピュータに実行させ、前記計数値の算出処理では、露光に対するパルス検出率の増加に対し、前記パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルを用いることを特徴としている。これにより、高い計数率に対しても数え落としの影響を減殺できる。

【 発明の効果 】

【 0 0 2 0 】

本発明によれば、従来の方法でカバーできなかった高い計数率に対しても数え落としの影響を減殺できる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 2 1 】

【 図 1 】 本発明の X 線検出システムの構成の一例を示す概略図である。

【 図 2 】 実施形態に係る X 線検出器の構成を示す概略図である。

【 図 3 】 実施形態に係る処理装置の機能的な構成を示すブロック図である。

【 図 4 】 本発明の X 線測定方法における、パルスの入力に対する出力値のカウントタイミングを示す概略図である。

【 図 5 】 パルスが重なった場合のパルス高さを示すグラフである。

10

20

30

40

50

【図 6】露光時間 t と時定数 τ の関係を示す概念図である。

【図 7】蓄積リング中のフィリングパターンの一例を示す図である。

【図 8】時間に対して検出電流を示す図である。

【図 9】時定数の測定における蓄積リング中のフィリングパターンおよび露光開始位置を示す図である。

【図 10】露光時間に対する各カウン트의イベントの単位時間当たりの回数を表すグラフである。

【図 11】Rising Edge をカウントする方法を示す概略図である。

【図 12】露光時間 t 、時定数 τ 、および読み出し時間の関係を示す概念図である。

【図 13】シミュレーションの結果を表すグラフである。

10

【図 14】大型放射光施設での実験の結果を表すグラフである。

【図 15】X線反射率法による実験の結果を表すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0022】

次に、本発明の実施の形態について、図面を参照しながら説明する。説明の理解を容易にするため、各図面において同一の構成要素に対しては同一の参照番号を付し、重複する説明は省略する。

【0023】

[実施形態]

(検出システムの構成)

20

図 1 は、X線検出システム 10 の構成の一例を示す概略図である。図 1 に示すように X線検出システム 10 は、X線源 20、試料 S、X線検出器 100 および処理装置 200 で構成されている。

【0024】

X線源 20 は、例えば、陰極であるフィラメントから放射された電子束を対陰極であるロータターゲットに衝突させて X線を発生させる。ロータターゲットの外周面には、例えば、Mo または Cu のような金属が設けられている。Mo ターゲットに電子が衝突したとき、特性線である Mo K α 線 (波長 0.711 Å) を含む X線が放射される。Cu ターゲットに電子が衝突したとき、特性線である Cu K α 線 (波長 1.542 Å) を含む X線が放射される。X線源 20 から放射される X線は、いわゆるポイントフォーカスの X線ビームである。

30

【0025】

試料 S は、試料支持装置により支持されている。X線検出器 100 は、例えば試料 S で回折された回折線のような X線を検出する。処理装置 200 は、検出された出力値を処理し、計数値を算出する。X線検出器 100 および処理装置 200 の詳細については、後述する。なお、露光に対するパルス検出率の増加に対し、パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルを用いた計数値の算出が、本発明において特徴的な工程である。以下の説明では、この工程を基本的に処理装置 200 内で行うことを前提に説明しているが、X線検出器 100 内で行うこともできる。

【0026】

(X線検出器の構成)

40

図 2 は、X線検出器 100 の構成を示す概略図である。X線検出器 100 は、フォトン・カウンティング型の半導体検出器であり、2次元のデータバッファ機能を有する。X線検出器 100 は、X線を検出し、検出データをフレームごとに外部へ転送する。なお、X線検出器 100 は、1次元検出器または 0次元検出器であってもよい。

【0027】

図 2 に示すように、X線検出器 100 は、センサ 110、読み出し回路 120、メモリ 150、転送回路 160 および制御回路 170 を備えている。なお、図 2 では便宜上一つのセンサ 110 に対する構成を示しているが、X線検出器 100 は、基本的に複数のセンサを備えている。読み出し回路 120 は、パルスの読み出しの機能を有し、ゲート 125

50

、検出回路 130 およびカウンタ 140 を備えている。

【0028】

センサ 110 は、露光により X 線の粒子が検出されたときにパルスを発生させる。センサ 110 は、受光面に入射する X 線束の強度を、面情報として検出できる。

【0029】

ゲート 125 は、ゲート開放時間の間だけパルスを検出回路 130 へ通過させる。本明細書では、ゲート 125 の開放時間を露光時間 t という。ゲート 125 の開閉は、電子シャッターで行なう。露光時間 t を短くすると時間分解能が上がり、より精度よく測れるため、露光時間 t は短いほうがよい。例えば、露光時間 t を後述するパルス信号の時定数より短くすると、一回の露光で 3 以上のパルスを検出することがなくなり、読み出しの負担が軽減されるため好ましい。露光時間 t はハードウェアの機能の限界により下限が定まるが、例えば、クロック周波数を高くすることや、ゲート制御の命令系をその他の制御とは別系統にして、1 ビットで命令をすること、CPU の内部でゲート制御だけクロックを n 倍（例えば 10 倍）にすることなどで、下限を下げるができる。

10

【0030】

検出回路 130 は、パルスが閾値より高いか否かを判定し、高い場合には電圧信号としてカウンタ 140 へ送出する。カウンタ 140 は、送出された電圧信号をパルスの個数として計数し出力値として出力することができる。メモリ 150 は、カウンタ 140 で計数された出力値をカウンタ 140 から読み出し記憶する。読み出しのタイミングは、基本的にゲート 125 を閉じた直後でよいが、待ち時間をおいて読み出すことも可能である。メモリ 150 は、読み出された整列していないデータを実空間配置へ変換し、後段へデータの転送を可能にする。また、メモリ 150 は、露光の合計時間または露光回数を記憶する。

20

【0031】

なお、検出回路は 1 つのセンサに対して複数存在してもよい。複数の検出回路を備える場合、検出回路ごとにカウンタを備える。また、複数の検出回路を備える場合、パルスの判定に用いる閾値を、検出回路ごとに異なるものとすることもできる。

【0032】

また、メモリは 1 つのセンサに対して書き込み用に切り換え可能な複数のメモリがあってもよい。複数のメモリを備える場合、1 のメモリを読み出ししている間にも、ゲートを開放し、露光することができるため、デューティ比を高くすることができる。また、複数のセンサを備える場合に、それぞれのセンサに対して独立に複数のメモリを設けてもよいが、複数のメモリは共用であってもよい。例えば、2 つのセンサに対して 2 つのメモリのみを設け、各センサからの書き込みに対してその 2 つのメモリが切り換え可能に存在すれば十分である。

30

【0033】

転送回路 160 は、メモリ 150 に記憶された出力値および露光時間の合計または露光回数を処理装置 200 へ転送する。制御回路 170 は、露光の合計時間または露光回数を、メモリ 150 に記憶させる。また、制御回路 170 は、ゲート 125 の開閉を制御し、出力値の読み出しおよび記憶を制御し、記憶された出力値および露光の合計時間または露光回数の処理装置 200 への転送を制御する。

40

【0034】

（処理装置の構成）

図 3 は、処理装置 200 の構成を示すブロック図である。処理装置 200 は、測定データ管理部 210、記憶部 220、算出部 230、補正部 240 を備えており、X 線検出器 100 で検出された X 線の出力値、および、露光の合計時間または露光回数に基づいて計数値または計数率を算出する。

【0035】

測定データ管理部 210 は、記憶部 220、算出部 230、および補正部 240 で扱われるデータを管理する。測定データ管理部 210 は、X 線検出器 100 のメモリ 150 に記憶された出力値、および、露光の合計時間または露光回数を、転送回路 160 を通じて

50

受け取り、記憶部 220 に記憶させる。

【0036】

記憶部 220 は、受け取った出力値、および、露光の合計時間または露光回数を記憶する。また、記憶部 220 は、出力値、および、露光の合計時間または露光回数に基づいて算出された計数值または計数率を記憶する。また、記憶部 220 は、補正部 240 で補正された露光の合計時間を記憶する。また、記憶部 220 は、パルス信号の時定数を記憶する。

【0037】

時定数は、記憶部 220 から読み出され、計数值の算出や露光時間の設定に用いられる。時定数は、スレッシュホールド等の設定値によって値が変わるため、予めテーブルの形式などで記憶しておけば、いずれの処理にも適応できる。なお、X線検出器 100 側にテーブルを記憶しておいて、読み出して使うこともできる。

10

【0038】

算出部 230 は、出力値および露光時間の合計に基づいて計数值または計数率を算出する。このとき、露光に対するパルス検出率の増加に対し、パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルを用いる。モデルの詳細は後述する。また、パルス検出率は、露光に対しパルス信号が検出された合計時間と露光の合計時間との比に相当する値とすることができる。相当する値とは、露光に対しパルス信号が検出された合計時間を、出力値に置き換えてもよいことをいい、露光の合計時間を、露光回数または補正された露光の合計時間に置き換えてもよいことをいう。

20

【0039】

補正部 240 は、露光の合計時間を補正する。露光の合計時間の補正は、例えば、1回の露光時間を、パルス信号の時定数と露光の単位時間（露光時間 t ）とを足した時間として、露光の合計時間を算出するようにしてもよい。これにより、実質的な露光時間で検出された計数值を得ることができる。

【0040】

処理装置 200 は、例えばパーソナルコンピュータである。パーソナルコンピュータは、例えば、演算制御するための CPU、データを記憶するためのメモリ、メモリ内の所定領域に記憶されたシステムソフト、およびメモリ内の他の所定領域に記憶されたアプリケーションプログラムソフト、等によって構成されている。

30

【0041】

処理装置 200 には、ユーザの入力を受け付ける入力部 300 としてキーボード等が接続されている。また、処理装置 200 には、ディスプレイやプリンタ等の出力部 400 が接続されている。出力部 400 は、処理装置 200 からの指示に従って計数值等を出力する。

【0042】

（X線測定方法）

次に、X線の検出から計数值の算出までのX線測定方法の概略を説明する。検出面に入ったX線がセンサにより検出されるとパルスが発生する。パルスは露光によりゲートが開放されている間に検出回路へ通過する。パルスは、検出回路においてそれぞれの閾値より高いか否かを判定され、高い場合には電圧信号としてカウンタへ送出される。パルスは、カウンタで計数される。カウンタの出力値は、メモリで読み出され、転送回路により処理装置に転送される。処理装置では、読み出された出力値に基づいて計数值が算出される。その際には、露光に対するパルス検出率の増加に対し、パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルが用いられる。

40

【0043】

（パルス信号の時定数）

パルス信号の時定数とは、単一のパルス信号の強度が閾値を超えている時間をいう。フォトン・カウンティング型の半導体検出器の場合、ROI回路に依存する。本発明では、本来のパルス信号の時定数を、露光条件の設定に用いることができる。また、計数

50

値の算出において使用する補正式にも用いることができる。なお、時定数の測定方法は、実施例として後述する。

【 0 0 4 4 】

(本発明のパルス信号のカウント方法)

図 4 は、本発明の X 線測定方法における、パルスのカウントタイミングを示す概略図である。図 4 の t_1 から t_{10} は、ゲートが開放された露光時間 t を示す。これら複数の露光時間 t のそれぞれに対し、その間にパルスの強度が閾値を超えていた場合、カウントをプラス 1 する。これは、当初から閾値を超えていた場合も、露光時間 t の間に閾値を超えた場合も同様にカウントをプラス 1 する。また、露光時間 t の間に、閾値を超えていたものが一旦閾値を下回り、再度閾値を超えた場合は、カウントをプラス 2 する。それ以上の場合も同様である。図 4 の例では、 t_3 、 t_6 、 t_7 、 t_{10} はプラスされず、 t_1 、 t_2 、 t_5 、 t_8 、 t_9 はプラス 1、 t_4 はプラス 2 で合計 7 カウントされることになる。なお、露光時間と露光時間の間の間隔は、等間隔でなくてもよい。

10

【 0 0 4 5 】

このカウント方法では、露光時間 t を時定数 よりも短く設定することが好ましい。露光時間 t を、時定数 よりも短くすると、露光時間 t の間に、閾値を超えていたものが一旦閾値を下回り、再度閾値を超える事象は、1 回以下になる。つまり、露光時間 t の間のカウントは 2 以下になる。また、露光時間 t を十分に短くすると、パルスの強度の増減における V 字の間隔を捉えられなくなるため、露光時間 t の間に数えられるカウントは 1 以下になる。露光時間 t を短くしていくことで、単位露光時間にカウントされるパルスの数が少なくなるため、誤計数が少なくなる。露光時間 t をパルス信号の時定数より短くすると、一回の露光で 3 以上のパルスを検出することがなくなるため、転送情報量を 2 ビット以下に設定することができる。そのため、読み出し時間の短縮ができる。

20

【 0 0 4 6 】

また、X 線計数値を解析等に使用する場合には、統計変動の影響が無視できる程度の計数値が必要である。例えば、相対標準偏差 1 % を得るためには、10,000 カウントの計数が必要である。露光時間 t あたりのパルス信号のカウント回数が 0, 1, 2 のいずれかであるため、10,000 ~ 30,000 カウントを目安に露光を繰り返して、露光の合計時間当たりのパルス信号のカウントが統計的に有意な値となるように露光回数を設定することが好ましい。

30

【 0 0 4 7 】

いずれのカウント方法においても、高計数領域、例えば 10 Mcps 以上の領域では、少なからず数え落としの影響を受ける。後段の処理では、数え落としの影響を補正することにより、本来のパルスの数に近づけるための補正を行う。

【 0 0 4 8 】

上記の本発明のパルス信号のカウント方法でカウントした結果を出力値として使用するのが好ましいが、Rising Edge をカウントする方法(後述)や検出器の回路上で時間トリガをかけ直す方法などで得られた結果を出力値としてもよい。

【 0 0 4 9 】

具体的には、パルス信号が検出されている合計時間を出力値として読み出し、読み出された出力値に基づいて本来のパルスの計数値を算出する。なお、パルス信号が検出されている合計時間(出力値)は、パルス信号が閾値を超えている時間を直接読み出して使用するか、パルス信号の合計のカウントに基づいて推定してもよい。計数値の算出では、露光に対するパルス検出率の増加に対し、パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルを用いる。

40

【 0 0 5 0 】

(パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルによる補正方法)

センサに X 線が連続して到達すると、パルス信号が重なり、重なったパルス信号の高さが閾値を超えると、閾値を超えている時間が長くなる。しかし、閾値を超えている時間は、パルスの重なりの方、時定数 にパルスの個数をかけた値よりも短くなる。例えば、2

50

つのパルス信号が重なった場合でも、閾値を超えている時間は の2倍より短く、3つのパルス信号が重なった場合でも の3倍より短い。

【0051】

本明細書では、閾値を超えている時間をパルス信号1つ当たりの時間に換算した値をパルス信号の見かけ上の時定数 a という。パルス信号の個数と見かけ上の時定数 a の関係は、式(1)で表される。

【数1】

$$N = \frac{T_{up}}{\tau_a} \quad \dots (1)$$

10

【0052】

図5は、パルスが重なった場合のパルス高さを示すグラフである。図5に示すように、パルスが検出されている時間 (T_{up}) 当たりに重なるパルス信号の個数 (N) が増加すると、見かけ上の時定数 a は徐々に短くなる。

【0053】

このような傾向は、パルス信号が重なる確率に関連する。そして、パルス検出率(計数率)が増加するとパルス信号の個数 (N) が増加し、パルス信号が重なる確率も高くなる。つまり、いくつの信号が重なっていたかを区別しなくとも見かけ上の時定数 a を確率から算出することは可能である。1つのパルス信号当たりの時間(見かけ上の時定数 a)は、パルス検出率(計数率)が増加するにつれて、時定数 よりも徐々に短くなる。すなわち、見かけ上の時定数 a は、時定数 と計数率の単調減少関数 f との積で表せる。その結果、閾値を超えている時間 T_{up} とパルス検出率(計数率)に対する見かけの時定数 a の関係から、真の計数値 (N) を算出することができる。

20

【0054】

(モデルの条件)

上記の計数値および計数率を算出するモデルは、以下の条件を有する必要がある。(1)パルス検出率の増加に対して、パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少する。(2)パルス検出率が0のとき、パルス信号の見かけ上の時定数は、時定数 に一致する。(3)パルス検出率が1のとき、パルス信号の見かけ上の時定数は、時定数 より小さい。好ましくは、パルス検出率が1に近づくとき、パルス信号の見かけ上の時定数は0に近づく。(4)モデルによって作成される計数値を算出する式は、無次元量である。なお、計数値を露光の合計時間で割ったものが、計数率である。

30

【0055】

(モデルの例)

モデルとして、以下の例のような計数値 N を算出する式(2)を用いることができる。 N は算出された計数値、 a はパルス信号の時定数、 T_{up} は露光に対しパルス信号が検出された合計時間、 T_{tot} は露光の合計時間を表す。また、 $a \cdot f(T_{up}, T_{tot})$ はパルス信号の見かけ上の時定数を表す。 $f(T_{up}, T_{tot})$ は、 T_{up} が0のとき1になり、 T_{up}/T_{tot} が0より大きく1より小さい範囲で増加するとき単調減少する。 $f(T_{up}, T_{tot})$ は、 T_{up}/T_{tot} が1に近づくとき、0に近づくことが好ましいが、0より大きく1より小さい定数となってもよい。

40

【数2】

$$N = \frac{T_{up}}{\tau \cdot f(T_{up}, T_{tot})} \quad \dots (2)$$

50

【数 3】

$$n = \frac{N}{T_{\text{tot}}} = \frac{T_{\text{up}}}{T_{\text{tot}} \cdot \tau \cdot f(T_{\text{up}}, T_{\text{tot}})} \quad \dots (3)$$

【0056】

式(1)に示す計数値Nを露光の合計時間 T_{tot} で割ることで、式(3)に示す計数率 n が得られる。引数 $T_{\text{up}}/T_{\text{tot}}$ の増加につれて関数値 $f(T_{\text{up}}/T_{\text{tot}})$ が常に減少することを単調減少という。 $f(T_{\text{up}}/T_{\text{tot}})$ は、そのような性質を持つ単調減少関数であればよい。 $f(T_{\text{up}}/T_{\text{tot}})$ は、 n 次関数や指数関数であってもよく関数の種類は問わない。

10

【0057】

見かけの時定数 $a (= \tau \cdot f)$ は、時定数 τ とこの単調減少関数の積であるから、言い換えれば、パルス検出率($T_{\text{up}}/T_{\text{tot}}$)の増加につれて、見かけの時定数 a も単調減少することになる。

【0058】

下記の実施例では、単調減少関数 $f(T_{\text{up}}, T_{\text{tot}})$ として、以下の式(4)を採用した。この関数は、 $0 < k < 1$ の範囲で k を定めることによって、単調減少関数となる。例えば、実験やシミュレーションを行い、計数率の範囲やシステムによって、さらに最適な定数 m を定めることで、理論的には計数率無限大まで補正を行うことができる。この場合の計数率 n は、式(5)の通りである。

20

【数 4】

$$f(T_{\text{up}}/T_{\text{tot}}) = T_{\text{tot}} \times \tau \times \left(1 - k \times \frac{T_{\text{up}}}{T_{\text{tot}}}\right)^m \quad \dots (4)$$

【数 5】

$$n = \frac{T_{\text{up}}}{T_{\text{tot}} \times \tau \times \left(1 - k \times \frac{T_{\text{up}}}{T_{\text{tot}}}\right)^m} \quad \dots (5)$$

30

【0059】

上記の補正式において、時定数 τ は検出回路やピクセルの設定値によって値が変わる。そのため、対応する検出器や測定条件によって、更新されることが好ましい。例えば、条件を変えて時定数 τ を測定し、ピクセルの設定値と対応するテーブル形式として記憶させた値を読み出して使用する。

40

【0060】

実施形態に記載の検出器では、パルス信号が検出された時間すなわちパルス信号が閾値を超えている時間を直接読み出すことが難しいため、露光に対しパルス信号が検出された合計時間 T_{up} を推定して値を出力値とすることができる。

【0061】

例えば、引用文献2記載の技術のように、回路上のハードウェアで時間トリガをかけ直し、計数されるカウントを真のカウントに近づける方法では、時定数 τ は一定であるため、時定数 τ に不感時間の回数をかけた値を T_{up} と推定することができる。

【0062】

50

本発明のカウント方法では、露光時間 t にパルス信号のカウント数の合計をかけた値を T_{up} としている。露光の合計時間 T_{tot} は、露光時間 t に露光回数をかけた値となる。また、パルスの検出率 (T_{up} / T_{tot}) は、パルス信号のカウント数の合計と露光回数の比に相当する。

【0063】

露光に対しパルス信号が検出された合計時間 T_{up} は、露光時間 t とカウント数の積で表され、露光の合計時間 T_{tot} は、露光時間 t と露光回数（フレーム数）との積で表される。したがって、パルスの検出率は、 $T_{up} / T_{tot} = \text{カウント数} / \text{露光回数}$ である。このような理由から、パルス信号のカウント数の合計と露光回数を出力値として扱うことで扱う数値が簡素化され、処理の負担が減る。

10

【0064】

（露光時間と時定数との関係）

なお、露光時間 t が時定数 τ よりも短い場合、露光の合計時間 T_{tot} は、露光時間 t と時定数 τ を足した値に露光回数をかけた値を使用することが好ましい。図6は、露光時間 t と時定数 τ との関係を示す概念図である。露光時間 t 内にカウントされる事象は、図6に示すように露光時間 t に対し、時定数 τ の分だけ前に発生したパルスから、露光時間 t の終了間際に発生したパルスまでである。そうすると、露光時間 t 内にカウントされる事象は、 $(t) + (\tau)$ の間に発生した事象である。したがって、複数の撮影画像を積算して出力するときなどは、この効果を考慮して補正をする必要がある場合がある。

20

【0065】

（まとめ）

以上のように、パルスが閾値を上向きに切ったタイミングでカウントするのではなく、露光を複数回繰り返し、多数のサンプリングの結果得られた出力値およびパルス検出率に基づいて、露光に対するパルス検出率の増加に対し、パルス信号の見かけ上の時定数が単調減少するモデルを用いて計数値を算出する。サンプリングでは、時定数 τ よりも短い露光時間 t の間にパルスが閾値を超えていたか否かの判定を、統計的に有意な数になるまで行う。これにより、従来の方法補正でカバーできなかった高い計数率に対しても数え落としの影響を減殺できる。

【0066】

〔実施例〕

（大型放射光施設での時定数 τ の測定）

電子を加速・貯蔵するための加速器群と発生した放射光を利用するための実験施設および各種付属施設を備える Spring-8 のトレインバンチを利用して、実施例の X 線検出器の時定数 τ を測定した。Spring-8 の放射光検出装置の一部として X 線検出器を組み込んで、以下の測定を行なった。

【0067】

例えば、Spring-8 では、電子銃から発生した電子ビームを、線型加速器により 1 GeV まで加速した後、シンクロトロンに導入して 8 GeV まで加速する。この電子ビームを蓄積リングに導入し、8 GeV のエネルギーを維持させながら、偏向電磁石や挿入光源により放射光を発生させる。発生した放射光は、ビームラインを通して、蓄積リング棟内外に設けられた実験ステーションに導かれる。なお、電子ビームは、基本的にリングの中に連続的に存在するのではなく、バンチと呼ばれる塊となって存在している。

40

【0068】

図7は、蓄積リング中のフィリングパターンの一例を示す図である。また、図8は、時間に対してバンチの検出電流を示す図である。具体的には Spring-8 の 2018 A (2018 年前期) セベラルバンチ運転モード (E モード) のフィリングパターンを示している。図7に示すフィリングパターンには、点状の電子の塊であるシングルバンチ SB1 と線状に電子の塊が連なったトレインバンチ TB1 が現れている。この運転モードでのバンチの飛来間隔は 165.2 ns であり、図8に示すように、上記の時間間隔で台

50

形状のトレインバンチとピーク状のシングルバンチが表れている。

【0069】

今回の時定数の測定では、Hモードバンチ構造のトレインバンチを利用した。Hモードバンチ構造による実験では、バンチが飛来しない間隔がある。図9に示すように、バンチが飛来する位置からスタートして測定すると、最初の40nsのゲートオープンより前にはX線が飛来しないため、これに基づいて時定数が測れる。トレイン起点部から露光をし、その露光時間を40nsから4ns単位で800nsまで延ばし、それぞれ10000回の検出を行い、イベントの単位時間当たりの回数を算出することで、ROIC内部の回路動作時間を確認した。

【0070】

図10のp1、p2、p3の曲線は、それぞれ1カウント、2カウント、3カウントのイベントの単位時間当たりの回数を表している。すなわち、40nsで10000回測定しそのうちの何回が1カウントで、何回が2カウント、何回が3カウントかを数えて、単位時間当たりの回数を算出し、プロットした。次に44nsで同様の測定を繰り返した。

【0071】

図10に示されるように、徐々に露光時間を延ばすとp2の曲線が立ち上がり2カウントのイベントが出てきた。この測定では、時定数より短い時間しか露光していないときは2カウント目が生じないため、2カウントが出始める位置が時定数を表す。図10によれば、2カウントのグラフが0に向かって落ち込んでいくところが約100nsなので、実施例のX線検出器の時定数は約100nsと分かった。なお、時定数の測定は、上記の方法に限られず、例えば、カウント・レートを変えて読み出したときのカウントから推定することもできる。

【0072】

(実施例1)

本発明のX線測定方法は、X線反射率法で利用するのに適している。X線反射率法では、反射X線の強度が大きいところから小さいところまでである。したがって、強度が大きいところでは本発明の方法を適用し、強度が小さいところでは従来の方法を適用することが好ましい。例えば、40nsec露光を100回入れて測定し、それとは別に1msec露光1回を入れて測定すると、面内に強度の分布があっても、弱いところは1msec露光によりデータをとることができ、強いところは40nsec露光によりデータをとることができる。

【0073】

高計数率のX線に対してアッテネータをいれて、例えば、1/10にX線強度を減衰させて測定する方法がある。これに対し、本発明ではアッテネータを入れずに測ることができる。したがって、アッテネータの出し入れがない分、システム全体の機構が簡単になる。なお、上記のように切り替える場合、切り換える動作をソフトウェアで行うことが好ましい。

【0074】

(実施例2)

本発明のX線測定方法は、Spring-8のような大型放射光施設で利用するのに適している。その場合には、大型放射光施設の放射光検出装置に付属する一般的なX線検出器から得られたデータを、本発明のX線測定方法、処理装置、またはプログラムを利用して処理する。

【0075】

(その他の実施例)

上記の他、単結晶X線回折法のうち金属錯体試料による全反射、X線小角散乱法等は、測定すべきX線の強度が大きくなるため、本発明のX線測定方法の利用が好適である。

【0076】

[シミュレーション]

本発明のX線測定方法とRising Edgeをカウントする方法との比較を、計算機

10

20

30

40

50

実験によりシミュレーションした。図11は、Rising Edgeをカウントする方法を示す概略図である。この方法では、図11に示すグラフ上の黒丸の位置、すなわちパルスが閾値を上向きに切ったタイミングでカウントし、これから単位時間あたりの観測計数率を求める。0 Mcpsより大きく20 Mcps以下のいくつかの計数率に対し、入力される計数率ごとに計算機でランダムにパルスを発生させ、Rising Edgeをカウントする方法、出力値から得られる計数率に単純な数え落とし補正をする方法、および本発明のX線測定方法を使用して得られる計数率をそれぞれ計算した。出力値から得られる計数率に単純な数え落とし補正をする方法では、以下の式(6)を用いて計数率nを算出した。なお、Iは、測定により得られた計数率を表す。図12は露光時間 t、時定数 および読み出し時間の関係を示す概念図である。

10

【数6】

$$n = \frac{I}{1 - I \times \tau} \quad \dots (6)$$

【0077】

また、本発明のX線測定方法では、上記の式(4)を用いて計数率nを算出した。なお、露光時間 tおよび時定数 は、上記実施例と同様とし、時定数 の影響を考慮して計数率nを補正した。図13は、その結果を表すグラフである。

20

【0078】

図13に表されるように、Rising Edgeをカウントする方法は、入力されるパルスの計数率が2 Mcpsを超えると、得られる計数率とリニアとの乖離が徐々に大きくなり、6 Mcpsを超えると得られる計数率が減少した。これは、入力されるパルスの計数率が大きくなると、パルスの重なりが頻発し、パルスが閾値を上向きに切るという事象が生じ難くなるためである。Rising Edgeをカウントした結果に数え落とし補正をする方法は、得られる計数率が従来の方法よりも若干リニアに近くなっているが、補正の基とする値が従来の方法によりカウントされた値であるため、入力されるパルスの計数率が大きくなると、得られる計数率が減少する点に変わりはない。

【0079】

30

これに対し、本発明のX線測定方法は、入力されるパルスの計数率が12 Mcps程度まで、リニアとの乖離が大きくならなかった。また、12 Mcpsを超えるとリニアとの乖離が多少大きくなったが、得られる計数率が減少することはなかった。本発明のX線測定方法は、モデルおよび式ごとに、信頼できる計数率の範囲は異なるが、理論上は無限大まで計算できる。

【0080】

[実験]

(大型放射光施設での実験)

Spring-8のトレインバンチを使用した10 keVのX線に対して、露光時間40 nsと露光時間1600 nsによるThScanを行ない、プロファイル形状の違いを確認した。ThScanとは、測定の際に設定する閾値(Threshold)を変化させながらX線強度を測定する方法である。光学系について同一露光条件下で、閾値に対する強度の変化を測定できる。

40

【0081】

図14は、その結果を表すグラフである。図14に表されるように、明らかに異なるプロファイルが得られた。このグラフから、時定数以下の露光時間に設定して計数することによる有効性が確かめられた。なお、図は、露光時間40 nsのときは、時定数分、実質的な露光時間が延びるので、Threshold 5 keV時の露光時間延長分を考慮して、2.5で割った値のグラフである。露光時間延長分の考慮とは、露光の合計時間として露光時間と時定数の和を用いることを意味している。

50

【 0 0 8 2 】

(X 線反射率法による実験)

X 線反射率法による実験として、ガラス基板上の酸化亜鉛膜 (Z n O) の反射 X 線を測定した。図 1 5 は、その結果を表すグラフである。4 0 n s 露光し、算出した結果を 2 5 0 0 0 枚加算したグラフでは、X 線検出器の時定数が 1 0 0 n s であるため、実質的な露光時間の合計は、3 . 5 m s となる。これに対し、1、2、3、4 m s 露光した方法では、ほぼ露光時間の補正は不要である。4 0 n s 露光した場合は、実質的に 3 . 5 m s 露光しているが、4 m s のグラフよりも計数率が高くなった。これにより、短時間の露光を繰り返すことにより、長時間の露光をしたときよりも数え落としの影響を減殺できることが分かった。

10

【符号の説明】

【 0 0 8 3 】

1 0 X 線検出システム

2 0 X 線源

S 試料

1 0 0 X 線検出器

1 1 0 センサ

1 2 0 読み出し回路

1 2 5 ゲート

1 3 0 検出回路

1 4 0 カウンタ

1 5 0 メモリ

1 6 0 転送回路

1 7 0 制御回路

2 0 0 処理装置

2 1 0 測定データ管理部

2 2 0 記憶部

2 3 0 算出部

2 4 0 補正部

3 0 0 入力部

4 0 0 出力部

S B 1 シングルバンチ

T B 1 トレインバンチ

20

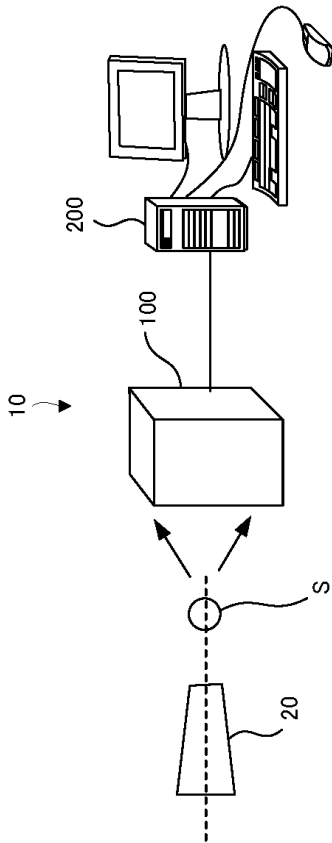
30

40

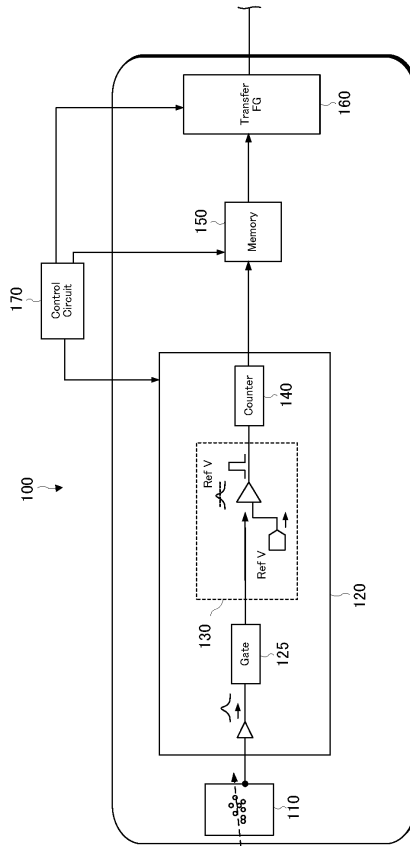
50

【図面】

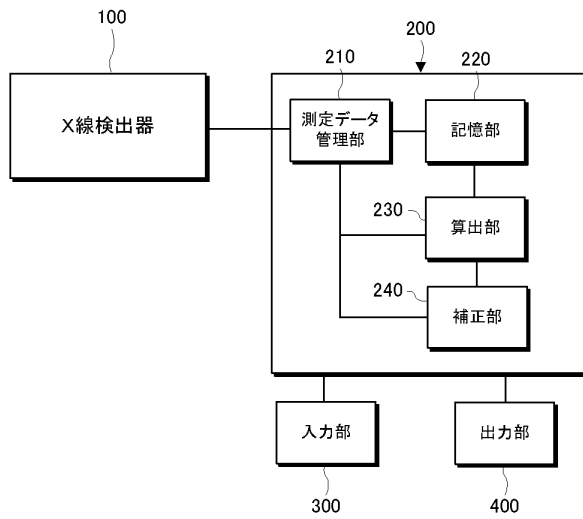
【図 1】



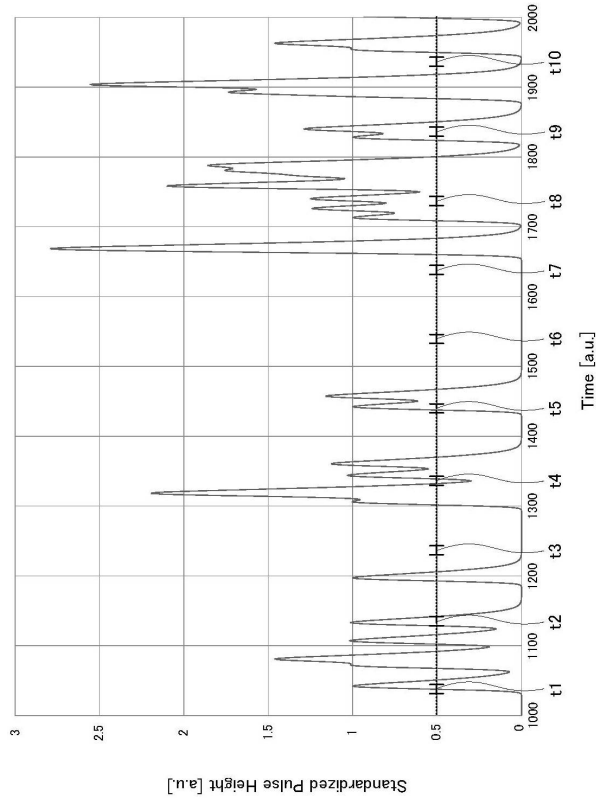
【図 2】



【図 3】



【図 4】



10

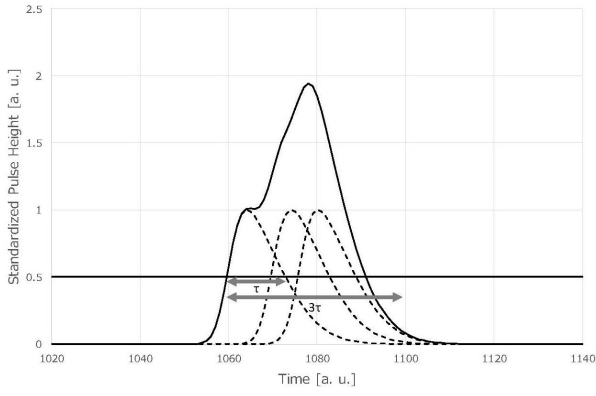
20

30

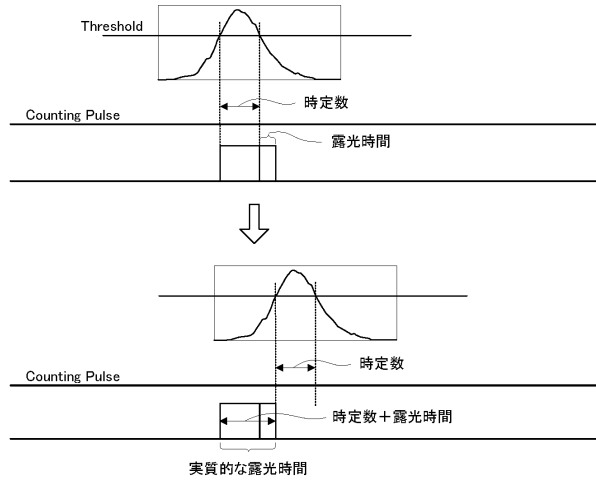
40

50

【図 5】

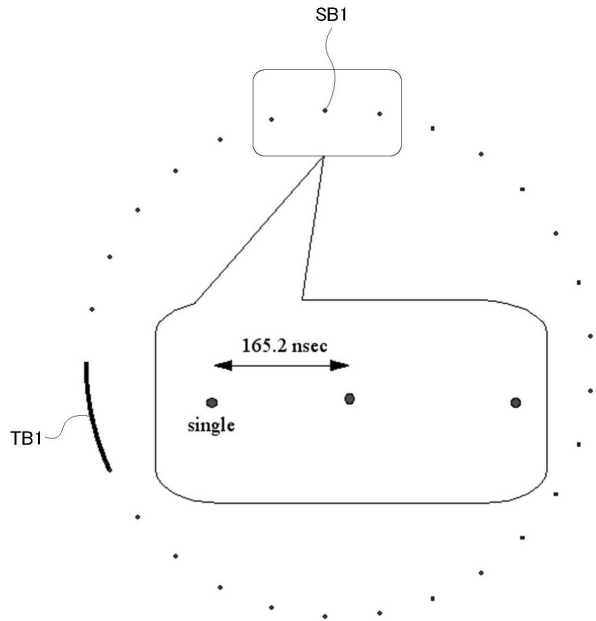


【図 6】

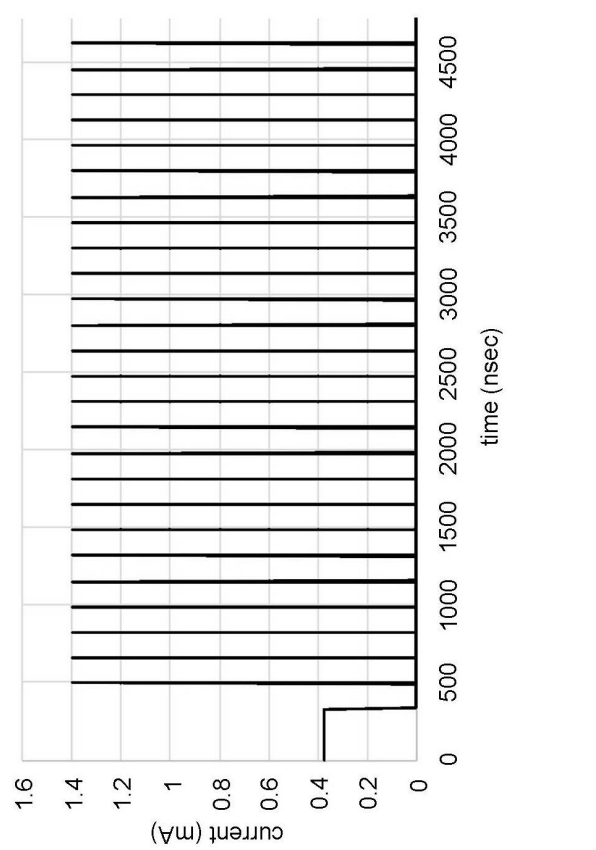


10

【図 7】



【図 8】



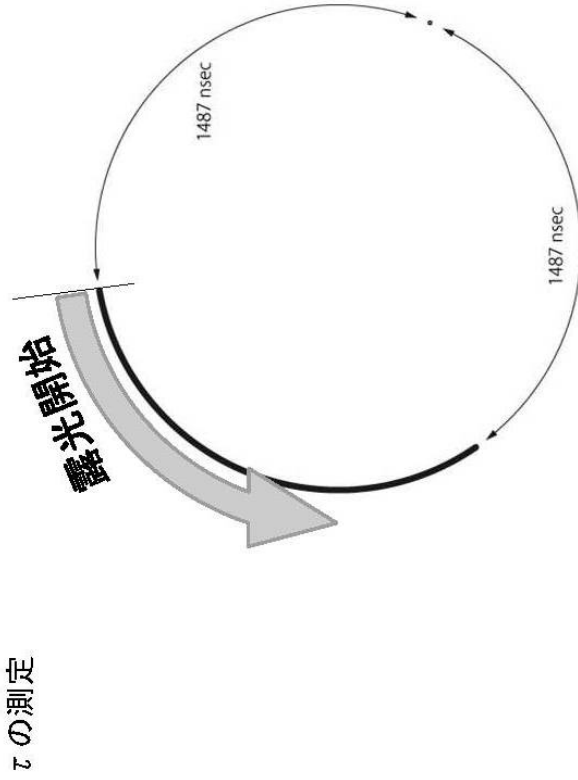
20

30

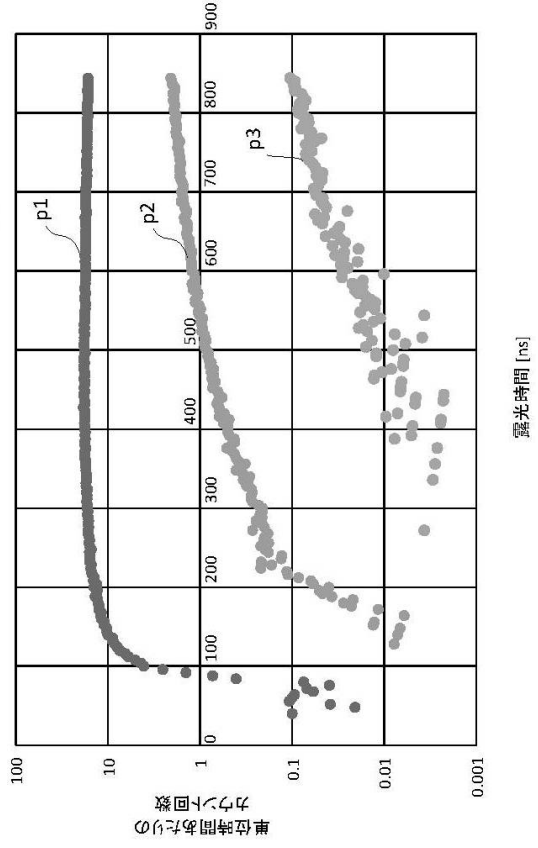
40

50

【図 9】



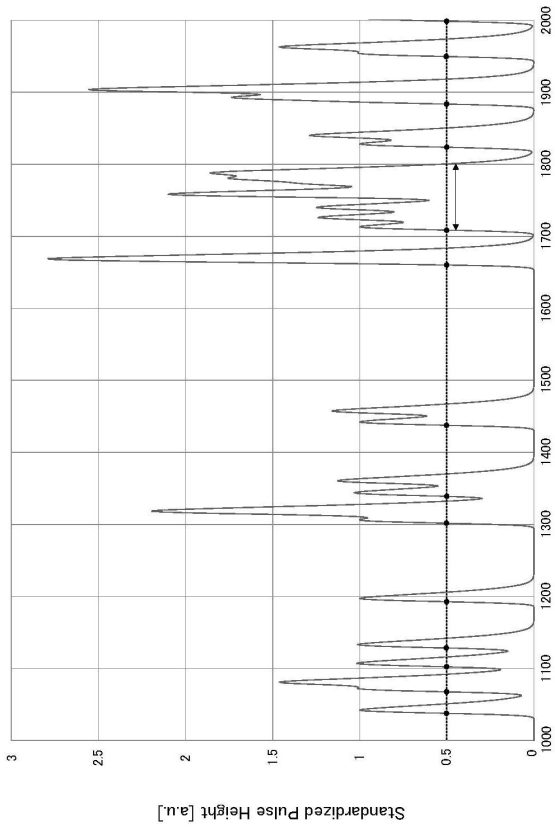
【図 10】



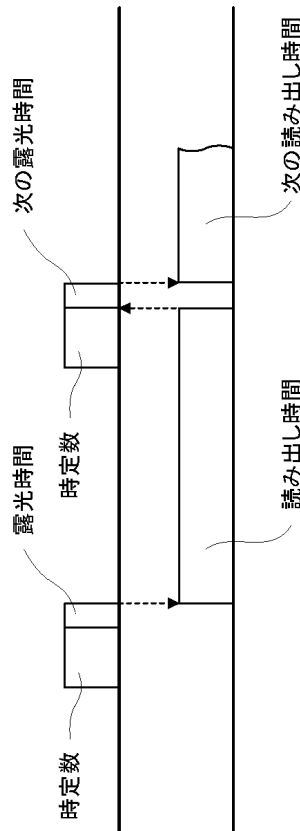
10

20

【図 11】



【図 12】

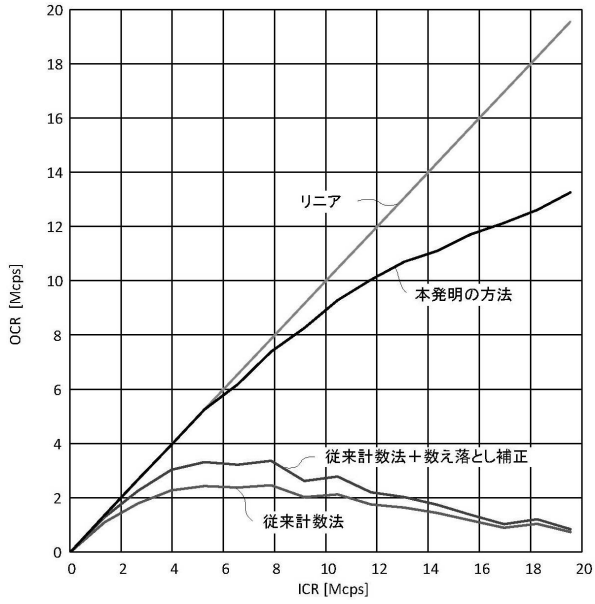


30

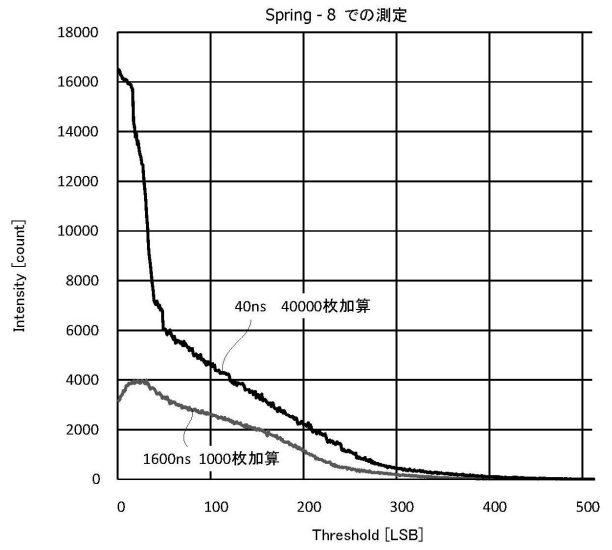
40

50

【図 13】

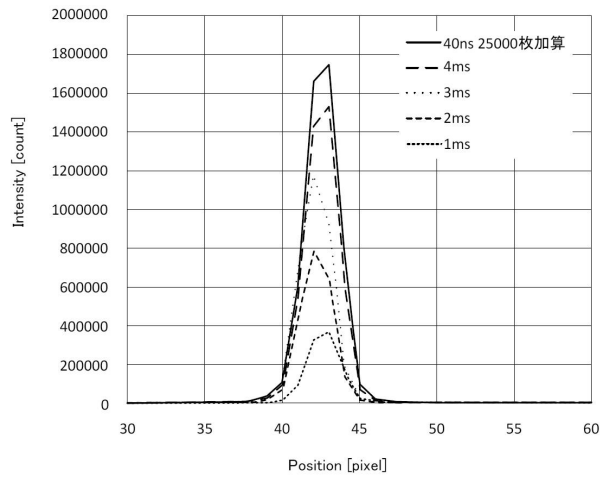


【図 14】



10

【図 15】



20

30

40

50

フロントページの続き

- (72)発明者 作村 拓人
東京都昭島市松原町3丁目9番12号 株式会社リガク内
- (72)発明者 佐久間 保孝
東京都昭島市松原町3丁目9番12号 株式会社リガク内
- 審査官 藤本 加代子
- (56)参考文献 特表2014-527162(JP,A)
特開平02-195293(JP,A)
特表2015-516832(JP,A)
特開2012-013563(JP,A)
特開平04-062493(JP,A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
G01T 1/00 - 1/16
G01T 1/167 - 7/12