(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2023年1月19日(19.01.2023)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2023/286353 A1

(51) 国際特許分類:
G01J 1/42 (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2022/011275

(22) 国際出願日： 2022年3月14日(14.03.2022)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(30) 優先権データ：
特願 2021-116367 2021年7月14日(14.07.2021) JP

(71) 出願人: 浜松ホトニクス株式会社 (**HAMAMATSU PHOTONICS K.K.**) [JP/JP]; 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１ Shizuoka (JP).

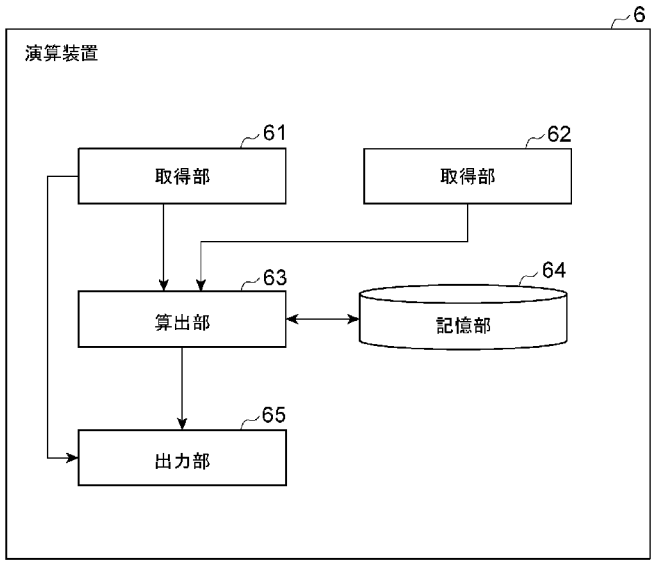
(72) 発明者: 牛津 暁成 (**USHIZU Toshiaki**); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１ 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 伊藤 聡和(**ITO Toshikazu**); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１ 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 神田 理(**KANDA Osamu**); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町１１２６番地の１ 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP).

(74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外 (**HASEGAWA Yoshiki et al.**); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目１番１号丸の内 ＭＹ ＰＬＡＺＡ（明治安田生命ビル） ９階 創英国際特許法律事務所 Tokyo (JP).

(54) **Title:** ARITHMETIC DEVICE, OPTICAL DETECTION DEVICE, AND GAIN CALCULATION METHOD

(54) 発明の名称： 演算装置、光検出装置、及びゲイン算出方法

［図4］



6 Arithmetic device
61, 62 Acquisition unit
63 Calculation unit
64 Storage unit
65 Output unit

(57) **Abstract:** This arithmetic device is for calculating the gain of a photomultiplier tube, and comprises: an acquisition unit that acquires a digital signal based on a dark pulse output from a photomultiplier tube which has been placed in a dark state; and a calculation unit that calculates a total number of electrons in the dark pulse on the basis of the digital signal and that calculates the gain of the photomultiplier tube on the basis of the total number of electrons.

WO 2023/286353 A1

［続葉有］

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JM, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一　国際調査報告（条約第21条(3)）

(57) 要約：演算装置は、光電子増倍管のゲインを算出する装置であって、暗中状態に置かれた光電子増倍管から出力されたダークパルスに基づくデジタル信号を取得する取得部と、デジタル信号に基づいてダークパルスの総電子数を算出し、総電子数に基づいて光電子増倍管のゲインを算出する算出部と、を備える。

明　細　書

発明の名称 ： 演算装置、光検出装置、及びゲイン算出方法

技術分野

[0001]　本開示は、演算装置、光検出装置、及びゲイン算出方法に関する。

背景技術

[0002]　光電子増倍管を含む光検出装置が知られている（例えば、特許文献１）。このような光検出装置では、光電子増倍管からの出力信号に基づいて、光電子増倍管に入射した光の光量（入射光量）が算出される。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開２０１４－９２７７４号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004]　光電子増倍管からの出力信号から入射光量を求めるために、光電子増倍管のゲインが用いられる。このゲインは光電子増倍管の周囲の環境及び使用状況によって変化し得るので、ゲインを測定することが求められる。ゲインを測定するための専用の回路を設けることも考えられるが、回路構造が複雑化する。

[0005]　本開示は、回路構造の複雑化を抑えつつ、光電子増倍管のゲインを算出可能な演算装置、光検出装置、及びゲイン算出方法を説明する。

課題を解決するための手段

[0006]　本開示の一側面に係る演算装置は、光電子増倍管のゲインを算出する装置である。この演算装置は、暗中状態に置かれた前記光電子増倍管から出力されたダークパルスに基づくデジタル信号を取得する取得部と、デジタル信号に基づいてダークパルスの総電子数を算出し、総電子数に基づいてゲインを算出する算出部と、を備える。

[0007]　この演算装置では、暗中状態に置かれた光電子増倍管から出力されたダー

クパルスに基づくデジタル信号が取得され、当該デジタル信号に基づいてダークパルスの総電子数が算出される。光電子増倍管が暗中状態に置かれている場合、１個の熱電子が発生し、１個の熱電子が増倍されることによってダークパルスが生じ得る。したがって、ダークパルスの総電子数が光電子増倍管のゲインに相当し得るので、総電子数に基づいてゲインが算出され得る。このように、ゲインを測定するための専用の回路を設ける必要が無いので、回路構造の複雑化を抑えつつ、光電子増倍管のゲインを算出することが可能となる。

[0008] デジタル信号は、アンプが変換係数を用いてダークパルスを電流電圧変換することによって得られた電圧信号を、ＡＤ変換器がサンプリング周波数で量子化することによって生成されてもよい。算出部は、デジタル信号と、変換係数と、サンプリング周波数と、に基づいて、総電子数を算出してもよい。この場合、デジタル信号を生成するために用いられた変換係数及びサンプリング周波数が考慮されるので、総電子数の算出精度を向上させることができる。その結果、ゲインの算出精度を向上させることが可能となる。

[0009] 算出部は、デジタル信号の波形の面積を算出し、ＡＤ変換器の量子化幅をサンプリング周波数で除算することによって得られる単位面積あたりの物理量と変換係数の逆数とを上記面積に乗算し、乗算結果を電気素量で除算することによって総電子数を算出してもよい。この場合、デジタル信号の波形の面積に単位面積あたりの物理量と変換係数の逆数とを乗算することによってダークパルスのクーロン量が得られる。そして、ダークパルスのクーロン量を電気素量で除算することによってダークパルスの総電子数が得られる。単位面積あたりの物理量、変換係数、及び電気素量は、いずれも一定値であるので、デジタル信号の波形の面積を求めるだけで、ゲインを容易に算出することができる。

[0010] 算出部は、複数のダークパルスのそれぞれについて総電子数を算出してもよく、複数のダークパルスの総電子数に基づいてゲインを算出してもよい。ダークパルスごとに総電子数がばらつくことがある。したがって、複数のダ

ークパルスの総電子数を算出し、それらの総電子数を用いることによってゲインの算出精度を向上させることができる。

[0011] 算出部は、ゲインに基づいて、ダークパルスを生じた際の光電子増倍管への供給電圧とは異なる供給電圧における別のゲインを算出してもよい。この場合、１つの供給電圧におけるゲインを用いて、別の供給電圧におけるゲインが算出される。したがって、ダークパルスを取得することなく様々な供給電圧におけるゲインを算出することができる。その結果、様々な供給電圧におけるゲインの算出を簡易化することが可能となる。

[0012] 本開示の別の側面に係る光検出装置は、光電子増倍管と、上記演算装置と、を備える。

[0013] この光検出装置は上述の演算装置を備えるので、回路構造の複雑化を抑えつつ、光電子増倍管のゲインを算出することが可能となる。

[0014] 本開示の更に別の側面に係るゲイン算出方法は、光電子増倍管のゲインを算出する方法である。このゲイン算出方法は、暗中状態に置かれた前記光電子増倍管から出力されたダークパルスに基づくデジタル信号を取得するステップと、デジタル信号に基づいてダークパルスの総電子数を算出し、総電子数に基づいてゲインを算出するステップと、を含む。

[0015] このゲイン算出方法では、暗中状態に置かれた光電子増倍管から出力されたダークパルスに基づくデジタル信号が取得され、当該デジタル信号に基づいてダークパルスの総電子数が算出される。光電子増倍管が暗中状態に置かれている場合、１個の熱電子が発生し、１個の熱電子が増倍されることによってダークパルスが生じ得る。したがって、ダークパルスの総電子数が光電子増倍管のゲインに相当し得るので、総電子数に基づいてゲインが算出され得る。このように、ゲインを測定するための専用の回路を設ける必要が無いので、回路構造の複雑化を抑えつつ、光電子増倍管のゲインを算出することが可能となる。

発明の効果

[0016] 本開示によれば、回路構造の複雑化を抑えつつ、光電子増倍管のゲインを

算出することができる。

図面の簡単な説明

[0017] [図1]図１は、一実施形態に係る演算装置を含む光検出装置を概略的に示す構成図である。

[図2]図２は、暗中状態に置かれた光電子増倍管から生じるダークパルスを説明するための図である。

[図3]図３は、図１に示される演算装置が取得するデジタル信号を説明するための図である。

[図4]図４は、図１に示される演算装置の機能構成を示すブロック図である。

[図5]図５は、図１に示される演算装置が行うゲイン算出方法を示すフローチャートである。

[図6]図６は、図５のゲイン計算処理を詳細に示すフローチャートである。

[図7]図７は、図３に示されるデジタル信号の波形の面積を説明するための図である。

発明を実施するための形態

[0018] 以下、本開示の実施形態について図面を参照しながら説明する。なお、図面の説明において同一要素には同一符号が付され、重複する説明は省略される。

[0019] 図１を参照しながら、一実施形態に係る演算装置を含む光検出装置の概略構成を説明する。図１は、一実施形態に係る演算装置を含む光検出装置を概略的に示す構成図である。図１に示される光検出装置１は、光を検出する装置である。光検出装置１は、光電子増倍管（photo-multiplier tube；ＰＭＴ）２と、アンプ３と、ＡＤ変換器（Analog to Digital Converter）４と、コンピュータ５と、演算装置６と、ＤＡ変換器（Digital to Analog Converter）７と、電源８と、を備えている。

[0020] 光電子増倍管２は、光電子増倍管２に入射した光（入射光）を電流信号に変換する構造体である。光電子増倍管２は、光電面２１と、電子増倍部２２と、アノード２３と、を含む（図２参照）。光電面２１は、入射光を光電子

に変換する部材（カソード）である。光電面２１は、入射光量に応じて光電子を生じ、光電子を電子増倍部２２に放出する。光電面２１は、暗中状態において熱電子を生じ、熱電子を電子増倍部２２に放出する。暗中状態とは、測定光及び背景光といった入射光が遮断されている状態である。

[0021] 電子増倍部２２は、光電面２１から放出された光電子及び熱電子を増倍する部分である。電子増倍部２２は、複数のダイノードを含む。本実施形態では、電子増倍部２２は、ｎ個のダイノード（ダイノードＤｙ１～Ｄｙｎ）を含む。ダイノードＤｙ１～Ｄｙｎは、その順に光電面２１からアノード２３に向かって多段に配列されている。ダイノードＤｙ１は、光電面２１から放出された光電子又は熱電子が衝突することによって二次電子を放出する。これにより、光電子又は熱電子が増倍される。ダイノードＤｙ１は、光電子又は熱電子とともに二次電子をダイノードＤｙ２に放出する。以降、ダイノードＤｙ２～Ｄｙｎ－１の各ダイノードは、前段のダイノードから放出された電子を増倍し、増倍した電子を後段のダイノードに放出する。最終段のダイノードＤｙｎは、増倍した電子をアノード２３に放出する。アノード２３は、電子増倍部２２において増倍された電子を収集し、収集した電子を電流信号として光電子増倍管２の外部に出力する。電流信号は、アナログ信号である。

[0022] アンプ３は、光電子増倍管２から出力された電流信号を電圧信号に変換する回路である。電圧信号は、アナログ信号である。アンプ３は、変換係数A_{cv}を用いて電流信号を電圧信号に変換する。アンプ３は、電圧信号をＡＤ変換器４に出力する。

[0023] ＡＤ変換器４は、アンプ３から出力された電圧信号をデジタル信号に変換する回路である。ＡＤ変換器４は、サンプリング周波数f_sで電圧信号をサンプリングし、サンプリングされた電圧信号を量子化幅Δｄで量子化することによって、デジタル信号を生成する。ＡＤ変換器４は、デジタル信号を演算装置６に出力する。

[0024] コンピュータ５は、演算装置６に各種パラメータの値を設定する。パラメ

ータの例としては、動作モード設定用のパラメータ、変換係数A_{cv}、サンプリング周波数f_s、量子化幅Δd、及び光電子増倍管２への供給電圧の電圧値が挙げられる。動作モード設定用のパラメータには、光検出装置１の動作モードを示す値が設定される。動作モードは、光検出装置１が通常の光検出を行う光検出モードと、光検出装置１が光電子増倍管２のゲインを測定（算出）するゲイン算出モードと、を含む。

[0025] 演算装置６は、ＡＤ変換器４から出力されたデジタル信号を用いて演算を行う装置である。演算装置６は、例えば、プロセッサと、メモリと、通信モジュールと、を含む回路（circuitry）として構成される。プロセッサの例としては、マイクロコンピュータ及びＣＰＵ（Central Processing Unit）が挙げられる。プロセッサに代えて、ＦＰＧＡ（Field Programmable Gate Array）が用いられてもよい。

[0026] 演算装置６は、コンピュータ５によって設定された動作モードに応じた演算を行う。動作モードが光検出モードに設定されている場合には、演算装置６は、ＡＤ変換器４から出力されたデジタル信号に基づいて入射光量を算出する。動作モードがゲイン算出モードに設定されている場合には、演算装置６は、ＡＤ変換器４から出力されたデジタル信号に基づいて光電子増倍管２のゲインを算出する。演算装置６は、コンピュータ５によって設定された供給電圧の電圧値に応じたコントロール電圧を、ＤＡ変換器７を介して電源８に出力する。コントロール電圧は、電源８に当該電圧値を有する供給電圧を供給させるための電圧である。演算装置６の機能構成については後述する。

[0027] 電源８は、光電子増倍管２に供給電圧を印加する装置である。電源８は、ＤＡ変換器７を介してコントロール電圧を受け取り、コントロール電圧に応じた供給電圧を光電子増倍管２に印加する。電源８は、例えば、高圧電源である。

[0028] なお、光電子増倍管２、アンプ３、及び電源８によってＰＭＴモジュール１０が構成されている。

[0029] 次に、図２及び図３を参照しながら、ゲイン算出モードにおける光検出装

置１の動作を説明する。図２は、暗中状態に置かれた光電子増倍管から生じるダークパルスを説明するための図である。図３は、図１に示される演算装置が取得するデジタル信号を説明するための図である。図２に示されるように、光検出装置１がゲイン算出モードで動作する場合、光電子増倍管２は、入射光が遮断された暗中状態に置かれる。光電子増倍管２は、例えば、暗室に配置される。ＰＭＴモジュール１０が光電子増倍管２に対する遮光機能（遮光構造）を有していてもよいし、ＰＭＴモジュール１０全体が暗中に配置されてもよい。光電子増倍管２が暗中状態に置かれている場合でも、光電面２１から熱電子（暗電流）が発生する。この熱電子が電子増倍部２２において増倍され、増倍された熱電子がアノード電流としてアノード２３から出力される。このアノード電流は、パルス状の波形を有するので、ダークパルスと称される。

[0030] 図３に示されるように、光電子増倍管２において発生したダークパルスI_{dark}がアンプ３によって電圧信号V_{dark}に変換される。そして、電圧信号V_{dark}がＡＤ変換器４によってデジタル信号ｓ（ｔ）に変換され、デジタル信号ｓ（ｔ）が演算装置６に出力される。演算装置６は、デジタル信号ｓ（ｔ）に基づいて光電子増倍管２のゲインを算出する。ゲイン算出方法については後述する。

[0031] 次に、図４を参照しながら、演算装置６の機能構成を説明する。図４は、図１に示される演算装置の機能構成を示すブロック図である。図４に示されるように、演算装置６は、機能的には、取得部６１と、取得部６２と、算出部６３と、記憶部６４と、出力部６５と、を含む。後述のゲイン算出方法の説明において、各機能部の機能（動作）を詳細に説明するので、ここでは各機能部の機能を簡単に説明する。

[0032] 取得部６１は、コンピュータ５から各パラメータの値を取得する機能部である。取得部６１は、例えば、動作モード設定用のパラメータ、変換係数A_{cv}、サンプリング周波数f_s、量子化幅Δｄ、及び光電子増倍管２への供給電圧の電圧値を取得する。

[0033] 取得部６２は、ＡＤ変換器４からデジタル信号を取得する機能部である。動作モードが光検出モードに設定されている場合には、取得部６２は、入射光に応じたデジタル信号を取得する。動作モードがゲイン算出モードに設定されている場合には、取得部６２は、光電子増倍管２において熱電子が増倍されることによって生じたダークパルスに基づくデジタル信号を取得する。

[0034] 算出部６３は、各種計算を行う機能部である。動作モードが光検出モードに設定されている場合には、算出部６３は、デジタル信号に基づいて入射光量を算出する。動作モードがゲイン算出モードに設定されている場合には、算出部６３は、デジタル信号に基づいてダークパルスの総電子数を算出し、総電子数に基づいて光電子増倍管２のゲインを算出する。算出部６３は、１つのダークパルスの総電子数を推定ゲインとして算出し、複数のダークパルスの推定ゲインに基づいて光電子増倍管２のゲインを算出してもよい。推定ゲインは、１つのダークパルス（デジタル信号）から算出されたゲインであり、電子増倍率とも称される。一方、複数のダークパルスの推定ゲイン（電子増倍率）に基づいて算出される平均値から得られる光電子増倍管２のゲインは、電流増倍率とも称される。

[0035] 記憶部６４は、推定ゲインを記憶（格納）する機能部である。記憶部６４は、算出部６３によって算出された推定ゲインを記憶する。

[0036] 出力部６５は、算出部６３の計算結果を出力する機能部である。動作モードが光検出モードに設定されている場合には、出力部６５は、入射光量を出力する。動作モードがゲイン算出モードに設定されている場合には、出力部６５は、光電子増倍管２のゲインを出力する。出力部６５は、ＤＡ変換器７を介してコントロール電圧を電源８に出力する。

[0037] 次に、図５～図７を参照しながら、演算装置６が行うゲイン算出方法を説明する。図５は、図１に示される演算装置が行うゲイン算出方法を示すフローチャートである。図６は、図５のゲイン計算処理を詳細に示すフローチャートである。図７は、図３に示されるデジタル信号の波形の面積を説明するための図である。図５に示される一連の処理は、例えば、動作モードがゲイ

ン算出モードに設定されたことによって開始される。なお、上述のように、光電子増倍管２は、暗中状態に置かれている。

[0038] 図５に示されるように、まず、取得部６１が各パラメータの値を取得する（ステップＳ１１）。ステップＳ１１では、取得部６１は、変換係数A_{cv}、サンプリング周波数f_s、量子化幅Δｄ、及び光電子増倍管２への供給電圧の電圧値を取得する。そして、取得部６１は、変換係数A_{cv}、サンプリング周波数f_s、及び量子化幅Δｄを算出部６３に出力するとともに、電圧値に応じたコントロール電圧を出力部６５に出力させる。

[0039] 上述のように、光電面２１から熱電子が発生する。この熱電子が電子増倍部２２において増倍され、アノード２３からダークパルスI_{dark}が出力される。そして、ダークパルスI_{dark}がアンプ３によって電圧信号V_{dark}に変換される。そして、ＡＤ変換器４において、サンプリング周波数f_sで電圧信号V_{dark}がサンプリングされ、サンプリングされた電圧信号V_{dark}が量子化幅Δｄで量子化されることによって、デジタル信号ｓ（ｔ）が生成される。そして、デジタル信号ｓ（ｔ）が演算装置６に入力される。つまり、デジタル信号ｓ（ｔ）は、離散的なデジタル値として演算装置６に入力される。時間ｔは離散時間であり、サンプリング時間（＝１／ｆｓ）ごとに１増加する。

[0040] 続いて、取得部６２がダークパルスI_{dark}に基づくデジタル信号ｓ（ｔ）を取得する（ステップＳ１２）。そして、取得部６２は、デジタル信号ｓ（ｔ）を算出部６３に出力する。

[0041] 続いて、ゲイン計算処理が行われる（ステップＳ１３）。ステップＳ１３では、図６に示されるように、まず算出部６３がデジタル信号ｓ（ｔ）の波形の面積S_{total}［単位：ｃｏｕｎｔ］を測定する（ステップＳ３１）。図７に示されるように、本実施形態では、デジタル信号ｓ（ｔ）は、開始時間ａから終了時間ｂまでのパルス状の波形を有する。式（１）に示されるように、面積S_{total}は、開始時間ａから終了時間ｂまでのデジタル値を合計することによって求められる。算出部６３は、式（１）を用いて面積S_{total}を算出（測定）する。

[数1]

$$S_{total} = \int_a^b s(t)\,dt \qquad [count] \tag{1}$$

[0042] 続いて、算出部６３は、電圧信号Ｖ$_{dark}$の信号量［単位：Ｖ・ｓ］を算出する（ステップＳ３２）。式（２）に示されるように、デジタル値の単位ビット（単位面積）あたりの物理量Δｓ［単位：Ｖ・ｓ／ｃｏｕｎｔ］は、量子化幅Δｄ［単位：Ｖ／ｃｏｕｎｔ］をサンプリング周波数ｆ$_s$［単位：Ｈｚ］で除算することによって求められる。

[数2]

$$\Delta s = \frac{\Delta d}{f_s} \qquad [V \cdot s/count] \tag{2}$$

[0043] 式（３）に示されるように、電圧信号Ｖ$_{dark}$の信号量は、面積Ｓ$_{total}$に物理量Δｓを乗算することによって求められる。算出部６３は、式（３）を用いて電圧信号Ｖ$_{dark}$の信号量を算出する。なお、説明の便宜上、数式において電圧信号Ｖ$_{dark}$の信号量を「Ｖ$_{dark}$」と表すことがある。

[数3]

$$V_{dark} = S_{total} \times \Delta s = S_{total} \times \frac{\Delta d}{f_s} \qquad [V \cdot s] \tag{3}$$

[0044] 続いて、算出部６３は、ダークパルスＩ$_{dark}$の電流量［単位：Ａ・ｓ］を算出する（ステップＳ３３）。アンプ３は電流信号を電圧信号に変換しているので、この逆変換を用いることで電圧信号Ｖ$_{dark}$の信号量からダークパルスＩ$_{dark}$の電流量が求められる。具体的には、式（４）に示されるように、ダークパルスＩ$_{dark}$の電流量は、電圧信号Ｖ$_{dark}$の信号量に変換係数Ａ$_{cv}$［単位：Ｖ／Ａ］の逆数を乗算することによって求められる。算出部６３は、式（４）を用いてダークパルスＩ$_{dark}$の電流量を算出する。なお、説明の便宜上、数式においてダークパルスＩ$_{dark}$の電流量を「Ｉ$_{dark}$」と表すことがある。

[数4]

$$I_{dark} = \frac{V_{dark}}{A_{cv}} = S_{total} \times \frac{\Delta d}{f_s \times A_{cv}} \qquad [A \cdot s] \tag{4}$$

[0045] 続いて、算出部６３は、ダークパルスＩ$_{dark}$のクーロン量［単位：Ｃ］を算出する（ステップＳ３４）。一般的に、１クーロン［Ｃ］は、１アンペア［Ａ］の電流が１秒間［ｓ］流れた時に運ばれる電気量と定義される。したがって、１［Ａ・ｓ］は、１［Ｃ］に置き換えることができる。したがって、式（５）に示されるように、ダークパルスＩ$_{dark}$のクーロン量は、ダークパルスＩ$_{dark}$の電流量と同じ値となる。算出部６３は、式（５）を用いてダークパルスＩ$_{dark}$のクーロン量を算出する。

[数5]

$$I_{dark} = S_{total} \times \frac{\Delta d}{f_s \times A_{cv}} \quad [C] \qquad (5)$$

[0046] 続いて、算出部６３は、ダークパルスＩ$_{dark}$の総電子数Ｄ$_{electron}$［単位：個］を算出する（ステップＳ３５）。一般的に、電子１個あたりの電荷量［Ｃ］は、電気素量ｅと称される。したがって、式（６）に示されるように、総電子数Ｄ$_{electron}$は、ダークパルスＩ$_{dark}$のクーロン量を電気素量ｅで除算することによって求められる。算出部６３は、式（６）を用いて総電子数Ｄ$_{electron}$を算出する。つまり、算出部６３は、デジタル信号ｓ（ｔ）の波形の面積Ｓ$_{total}$を算出し、量子化幅Δｄをサンプリング周波数ｆ$_{s}$で除算することによって得られる単位ビット（単位面積）あたりの物理量Δｓと変換係数Ａ$_{cv}$の逆数とを面積Ｓ$_{total}$に乗算し、その乗算結果を電気素量ｅで除算することによって総電子数Ｄ$_{electron}$を算出する。

[数6]

$$D_{electron} = S_{total} \times \frac{\Delta d}{e \times f_s \times A_{cv}} \quad [個] \qquad (6)$$

[0047] 続いて、算出部６３は、推定ゲインμ［単位：倍］を算出する（ステップＳ３６）。式（７）に示されるように、総電子数Ｄ$_{electron}$は、光電面２１（カソード）から１番目のダイノードＤｙ１に入射した電子数Ｋ$_{electron}$［単位：個］と推定ゲインμとを乗算することによって求められる。

[数7]

$$D_{electron} = K_{electron} \times \mu \quad [個] \qquad (7)$$

[0048] ここで、ダークパルスは、光電面２１からの熱電子に主に起因して発生する。ダークパルスは、離散的に発生するとともに、ほとんどの場合には１個の熱電子を起因として発生する。このことから、式（７）は、式（８）として簡略化され得る。

[数8]

$$D_{electron} = \mu \quad [個] \tag{8}$$

[0049] 式（８）は、熱電子を測定可能な環境（暗中状態）においては総電子数$D_{electron}$と推定ゲインμとが同じ値となることを示している。よって、式（８）の右辺と左辺とを入れ替えることによって、式（９）が得られる。算出部６３は、式（９）を用いて推定ゲインμを算出する。

[数9]

$$\mu = D_{electron} = S_{total} \times \frac{\Delta d}{e \times f_s \times A_{cv}} \quad [倍] \tag{9}$$

[0050] 以上により、ゲイン計算処理が終了する。そして、算出部６３は、推定ゲインμを記憶部６４に格納する（ステップＳ１４）。

[0051] 続いて、算出部６３は、測定を終了するか否かを判定する（ステップＳ１５）。ステップＳ１５では、算出部６３は、予め設定された算出回数分の推定ゲインμが算出されていない場合に、測定を終了しないと判定する。算出部６３は、上記算出回数分の推定ゲインμが算出された場合に、測定を終了すると判定する。算出回数は、例えば、１０００回程度に設定される。ステップＳ１５において、測定を終了しないと判定された場合（ステップＳ１５；ＮＯ）、ステップＳ１２～Ｓ１５が再び行われる。

[0052] 一方、ステップＳ１５において、測定を終了すると判定された場合（ステップＳ１５；ＹＥＳ）、算出部６３は、記憶部６４から算出回数分の推定ゲインμを読み出し、算出回数分の推定ゲインμの平均値を計算する（ステップＳ１６）。そして、算出部６３は、平均値を光電子増倍管２のゲインとして出力部６５に出力する。

[0053] 続いて、出力部６５は、算出部６３からゲインを受け取ると、ゲインを演

算装置６の外部に出力する（ステップＳ１７）。出力部６５は、例えば、供給電圧の電圧値とともにゲインをコンピュータ５に出力する。そして、コンピュータ５は、供給電圧の電圧値とゲインとを対応付けて記憶する。

[0054] 以上により、ゲイン算出方法の一連の処理が終了する。なお、推定ゲインμは式（９）によって求められるので、面積S_{total}が測定されれば、推定ゲインμは算出され得る。したがって、ステップＳ３２～Ｓ３５は省略されてもよい。ステップＳ１１の少なくとも一部は、動作モードがゲイン算出モードに設定される前に実施されてもよい。

[0055] 例えば、測定条件として、サンプリング周波数f_sが１００ＭＳＰＳ（Mega-sample(s) per second）に設定され、量子化幅Δｄが０．１ｍＶ／ｃｏｕｎｔに設定され、変換係数A_{cv}が０．１Ｖ／μＡに設定されたと仮定する。この測定条件において観測されたデジタル信号ｓ（ｔ）の波形の面積S_{total}が1×10^{5}ｃｏｕｎｔであったとする。式（３）から、電圧信号V_{dark}の信号量は、1×10^{-7}Ｖ・ｓ（＝$1\times10^{5}\times\{1/(100\times10^{6})\}\times(0.1\times10^{-3})$）と算出される。

[0056] さらに、式（４）から、ダークパルスI_{dark}の電流量は、1×10^{-12}Ａ・ｓ（＝$1\times10^{-7}\times10\times10^{-6}$）と算出される。上述のように、１［Ｃ］は、１［Ａ・ｓ］と等しいので、ダークパルスI_{dark}のクーロン量は、1×10^{-12}Ｃとなる。電気素量ｅは1.602×10^{-19}Ｃであるので、式（６）から電子数$D_{electron}$は、6.24×10^{6}個（≒$(1\times10^{-12})/(1.602\times10^{-19})$）と算出される。１個の熱電子から$6.24\times10^{6}$個の電子が発生したことから、推定ゲインμは$6.24\times10^{6}$と推定される。

[0057] 以上の計算が１０００波形以上のデジタル信号ｓ（ｔ）に対して行われ、これらの計算によって得られた推定ゲインμの平均値が光電子増倍管２のゲインとされる。

[0058] 次に、動作モードが光検出モードに設定された場合の演算装置６の動作について簡単に説明する。まず取得部６１が、パラメータの値として、変換係

数A_{cv}、サンプリング周波数f_s、量子化幅Δd、光電子増倍管２への供給電圧の電圧値、及び当該電圧値に対応付けられたゲインをコンピュータ５から取得する。そして、取得部６１は、変換係数A_{cv}、サンプリング周波数f_s、量子化幅Δd、及びゲインを算出部６３に出力するとともに、電圧値に応じたコントロール電圧を出力部６５に出力させる。

[0059] そして、取得部６２が入射光に基づくデジタル信号ｓ（ｔ）を取得し、デジタル信号ｓ（ｔ）を算出部６３に出力する。そして、算出部６３は、変換係数A_{cv}、サンプリング周波数f_s、量子化幅Δd、及びゲインを用いて、デジタル信号ｓ（ｔ）から入射光量を算出し、入射光量を出力部６５に出力する。そして、出力部６５は、入射光量を演算装置６の外部に出力する。以上により、光検出モードにおける一連の処理が終了する。

[0060] 以上説明した光検出装置１、演算装置６、及びゲイン算出方法では、暗中状態に置かれた光電子増倍管２から出力されたダークパルスI_{dark}に基づくデジタル信号ｓ（ｔ）が取得され、当該デジタル信号ｓ（ｔ）に基づいてダークパルスI_{dark}の総電子数$D_{electron}$が算出される。光電子増倍管２が暗中状態に置かれている場合、１個の熱電子が発生し、１個の熱電子が増倍されることによってダークパルスI_{dark}が生じ得る。したがって、ダークパルスI_{dark}の総電子数$D_{electron}$が推定ゲインμに相当し得るので、総電子数$D_{electron}$に基づいて光電子増倍管２のゲインが算出され得る。

[0061] 上述のように、デジタル信号ｓ（ｔ）から入射光量を算出するために用いられるパラメータ値のほとんどが一定値であるが、ゲインは光電子増倍管２の周囲環境及び使用状況に応じて変化し得る。ゲインを測定するための測定回路を設けることが考えられるが、回路構造が複雑化するおそれがある。ゲインを安定化させる構造を採用することも考えられるが、光電子増倍管２が大型化するおそれがある。基準光源を搭載することも考えられるが、基準光源を高安定化させる必要があり、光検出装置１が大型化するおそれがある。光検出装置１、演算装置６、及びゲイン算出方法では、ゲインを測定するための専用の回路、ゲインを安定化させる構造、及び基準光源を設ける必要が

無いので、回路構造の複雑化を抑えつつ、光電子増倍管２のゲインを算出することが可能となる。

[0062] 演算装置６が取得するデジタル信号ｓ（ｔ）は、アンプ３が変換係数A_{cv}を用いてダークパルスI_{dark}を電流電圧変換することによって得られた電圧信号V_{dark}を、ＡＤ変換器４がサンプリング周波数f_sで量子化することによって生成される。算出部６３は、デジタル信号ｓ（ｔ）と、変換係数A_{cv}と、サンプリング周波数f_sと、に基づいて、総電子数$D_{electron}$を算出する。この構成によれば、デジタル信号ｓ（ｔ）を生成するために用いられた変換係数A_{cv}及びサンプリング周波数f_sが考慮されるので、総電子数$D_{electron}$の算出精度を向上させることができる。その結果、ゲインの算出精度を向上させることが可能となる。

[0063] 具体的には、デジタル信号ｓ（ｔ）の波形の面積S_{total}に物理量Δｓと変換係数A_{cv}の逆数とを乗算することによってダークパルスI_{dark}のクーロン量が得られる。そして、ダークパルスI_{dark}のクーロン量を電気素量ｅで除算することによってダークパルスI_{dark}の総電子数$D_{electron}$が得られる。物理量Δｓ、変換係数A_{cv}、及び電気素量ｅは一定値であるので、面積S_{total}を求めるだけで、ゲインを容易に算出することができる。

[0064] ダークパルスI_{dark}ごとに総電子数$D_{electron}$がばらつくことがある。これに対して、算出部６３は、予め定められた算出回数分のダークパルスI_{dark}のそれぞれについて総電子数$D_{electron}$を算出し、これらの総電子数$D_{electron}$に基づいてゲインを算出する。具体的には、算出部６３は、各ダークパルスI_{dark}から得られた推定ゲインμの平均値を光電子増倍管２のゲインとして算出する。言い換えると、算出部６３は、算出回数分のダークパルスI_{dark}の総電子数$D_{electron}$の平均値を光電子増倍管２のゲインとして算出する。このように、複数のダークパルスI_{dark}の総電子数$D_{electron}$を用いることによってゲインの算出精度を向上させることができる。

[0065] なお、本開示に係る光検出装置は上記実施形態に限定されない。

[0066] 外部のコンピュータから各パラメータの値が設定されてもよい。この場合

、光検出装置１は、コンピュータ５を備えていなくてもよい。外部の電源から光電子増倍管２に供給電圧の供給を受けてもよい。この場合、光検出装置１は、ＤＡ変換器７及び電源８を備えていなくてもよい。

[0067] 上記実施形態では、算出部６３は、複数回のダークパルスから得られた推定ゲインの平均値を光電子増倍管２のゲインとしているが、光電子増倍管２のゲインの算出方法はこれに限られない。例えば、算出部６３は、１つのダークパルスから得られた推定ゲインを光電子増倍管２のゲインとしてもよい。算出部６３は、複数回のダークパルスから得られた推定ゲインの中央値を光電子増倍管２のゲインとして算出してもよい。

[0068] 算出部６３は、１つの供給電圧に対して算出したゲインに基づいて、別の供給電圧におけるゲインを算出してもよい。別の供給電圧は、ゲイン算出モードにおいて、ダークパルスを生じた際の光電子増倍管２への供給電圧とは異なる供給電圧である。式（１０）に示されるように、光電子増倍管２のゲインは、定数Ａ、供給電圧の電圧値Ｖ、及び値ｋｎを用いて表現され得る。値ｋｎは、光電子増倍管２の構造で定まる値である。

[数10]

$$ゲイン = A \times V^{kn} \tag{10}$$

[0069] 例えば、供給電圧とゲインとの関係は、両対数グラフで描画された場合、値ｋｎに等しい傾きを有する直線となる。よって、式（１０）から、１つの供給電圧におけるゲインを用いて、別の供給電圧におけるゲインを算出することができる。したがって、ダークパルスを取得することなく様々な供給電圧におけるゲインを算出することができる。その結果、様々な供給電圧におけるゲインの算出を簡易化することが可能となる。

[0070] 演算装置６は、複数の供給電圧のそれぞれに対して、上述のゲイン算出方法によってゲインを算出してもよい。

[0071] 光検出装置１は、所定光量の微弱光を出力可能な光源（例えば単一光子光源）を更に備えてもよい。この場合、光源から光電面２１に微弱光を照射することで、演算装置６は、ダークパルスに基づくデジタル信号と一緒に当該

光源からの微弱光のデジタル信号を取得し、これらのデジタル信号に基づいてゲインを算出してもよい。なお、光検出装置１が上記光源を備えていなくてもよく、光検出装置１の外部の光源がゲイン算出時に用いられてもよい。

符号の説明

[0072] １…光検出装置、２…光電子増倍管、３…アンプ、４…ＡＤ変換器、５…コンピュータ、６…演算装置、７…ＤＡ変換器、８…電源、２１…光電面、２２…電子増倍部、２３…アノード、６１…取得部、６２…取得部、６３…算出部、６４…記憶部、６５…出力部。

請求の範囲

[請求項1] 光電子増倍管のゲインを算出する演算装置であって、

暗中状態に置かれた前記光電子増倍管から出力されたダークパルスに基づくデジタル信号を取得する取得部と、

前記デジタル信号に基づいて前記ダークパルスの総電子数を算出し、前記総電子数に基づいて前記ゲインを算出する算出部と、

を備える演算装置。

[請求項2] 前記デジタル信号は、アンプが変換係数を用いて前記ダークパルスを電流電圧変換することによって得られた電圧信号を、ＡＤ変換器がサンプリング周波数で量子化することによって生成され、

前記算出部は、前記デジタル信号と、前記変換係数と、前記サンプリング周波数と、に基づいて、前記総電子数を算出する、請求項１に記載の演算装置。

[請求項3] 前記算出部は、前記デジタル信号の波形の面積を算出し、前記ＡＤ変換器の量子化幅を前記サンプリング周波数で除算することによって得られる単位面積あたりの物理量と前記変換係数の逆数とを前記面積に乗算し、乗算結果を電気素量で除算することによって前記総電子数を算出する、請求項２に記載の演算装置。

[請求項4] 前記算出部は、複数のダークパルスのそれぞれについて前記総電子数を算出し、前記複数のダークパルスの総電子数に基づいて前記ゲインを算出する、請求項１～請求項３のいずれか一項に記載の演算装置。

[請求項5] 前記算出部は、前記ゲインに基づいて、前記ダークパルスを生じた際の前記光電子増倍管への供給電圧とは異なる供給電圧における別のゲインを算出する、請求項１～請求項４のいずれか一項に記載の演算装置。

[請求項6] 前記光電子増倍管と、

請求項１～請求項５のいずれか一項に記載の演算装置と、

を備える光検出装置。

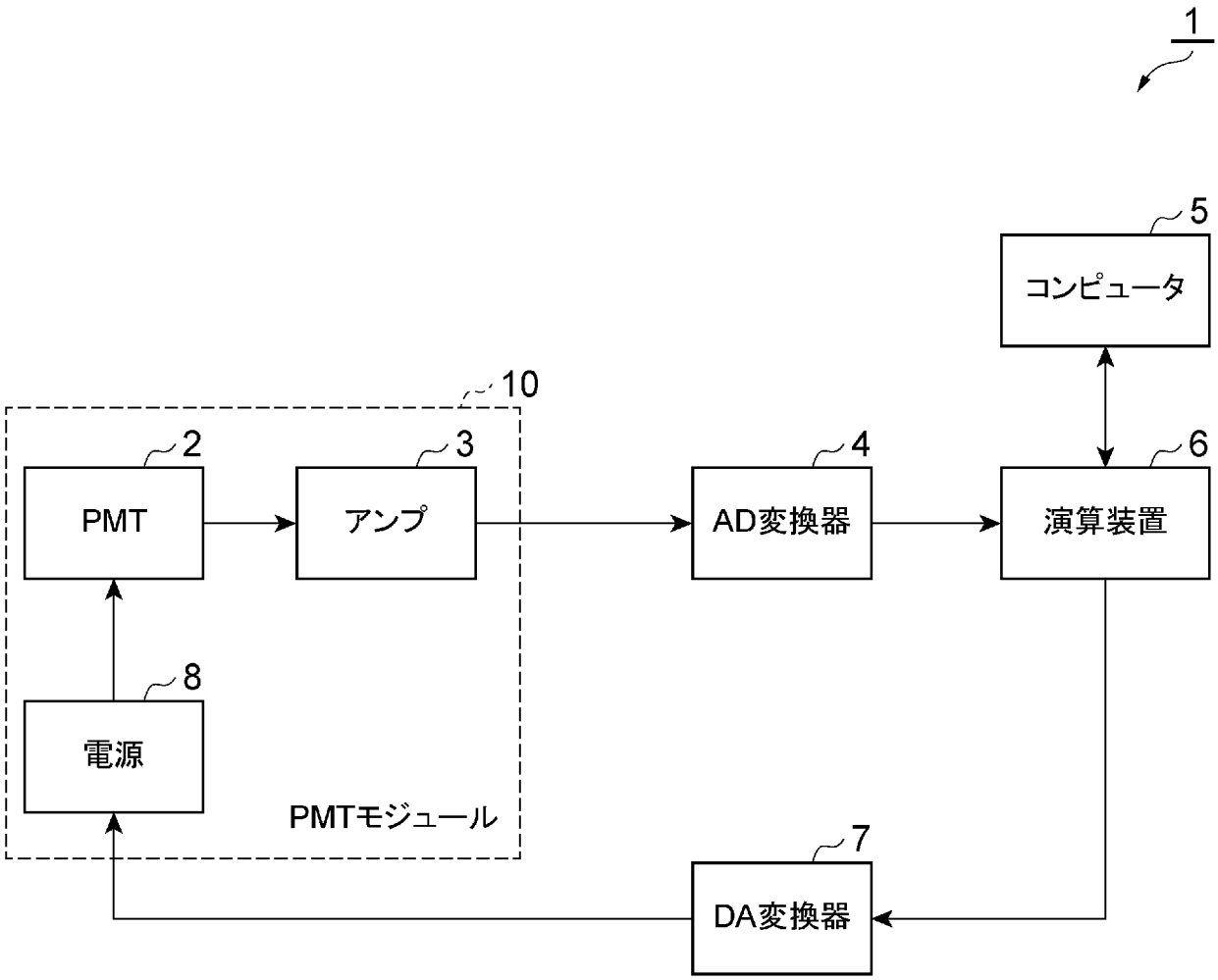
[請求項7] 光電子増倍管のゲインを算出するゲイン算出方法であって、

暗中状態に置かれた前記光電子増倍管から出力されたダークパルスに基づくデジタル信号を取得するステップと、

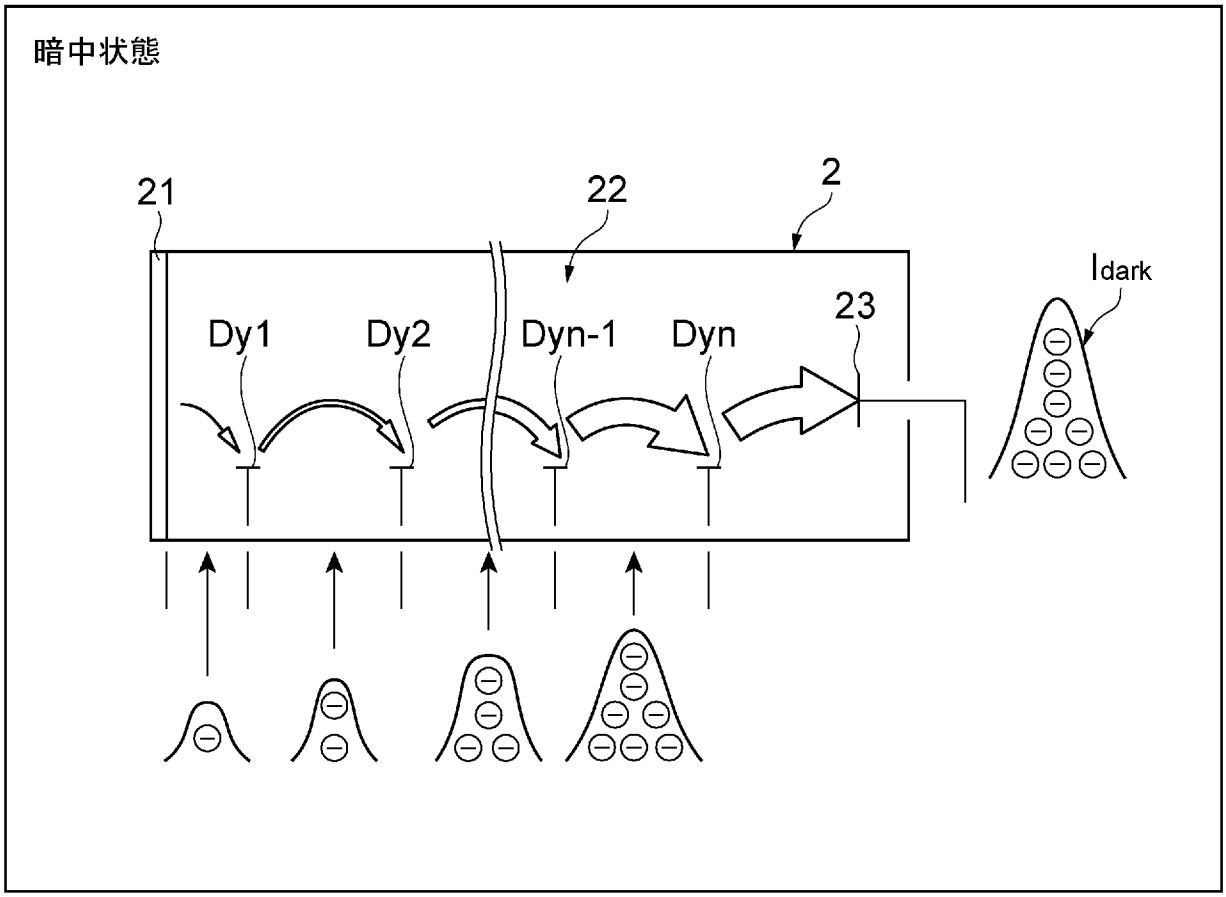
前記デジタル信号に基づいて前記ダークパルスの総電子数を算出し、前記総電子数に基づいて前記ゲインを算出するステップと、

を含むゲイン算出方法。

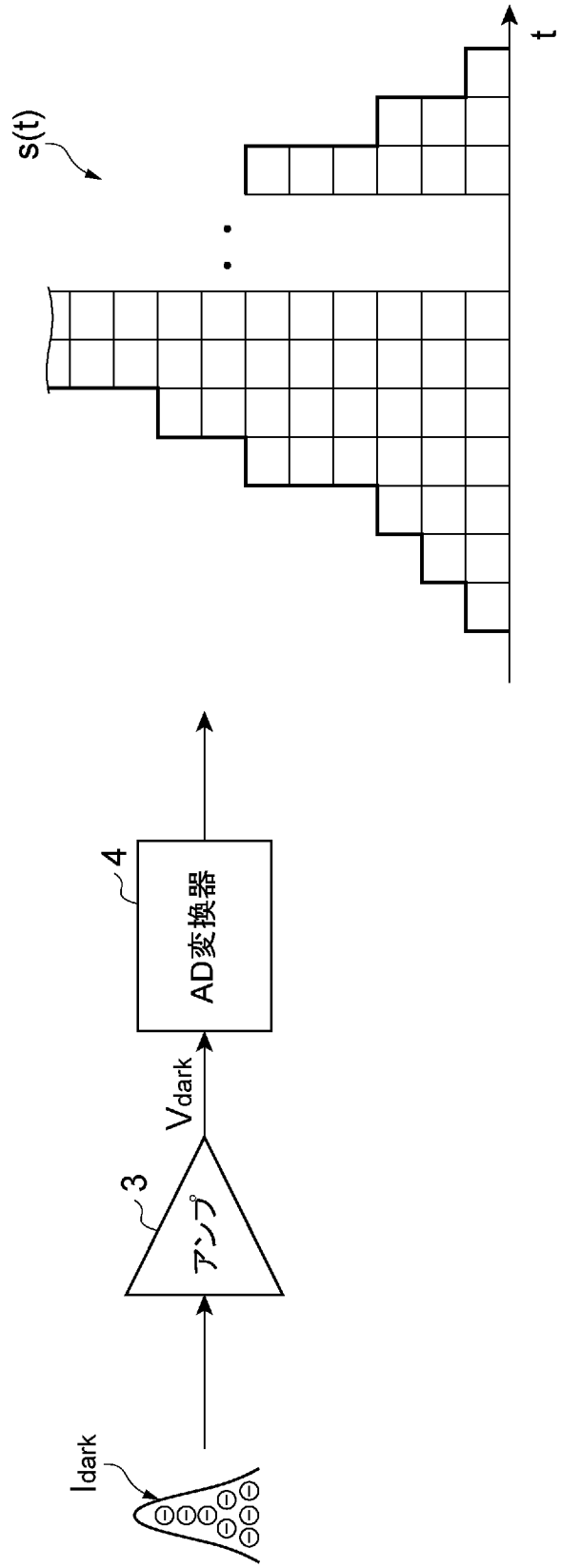
[図1]



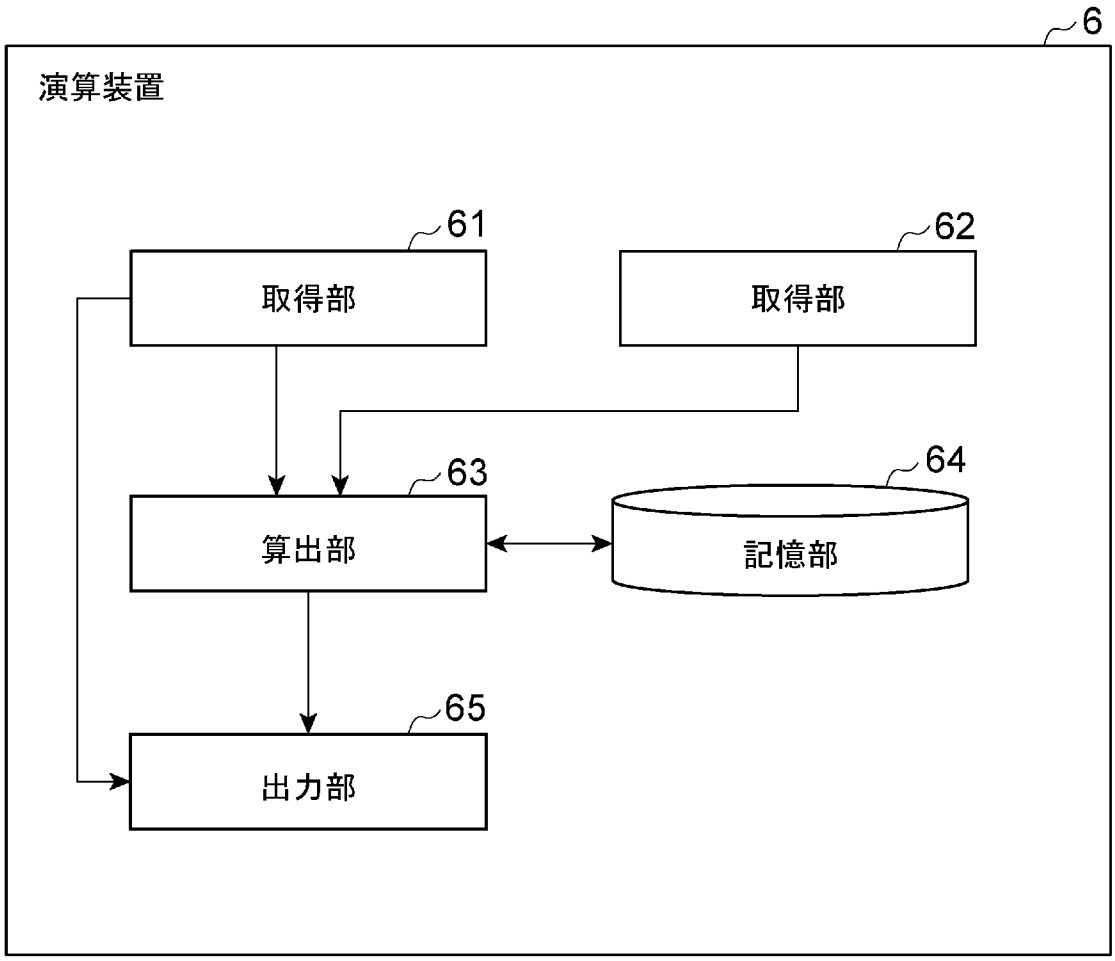
[図2]



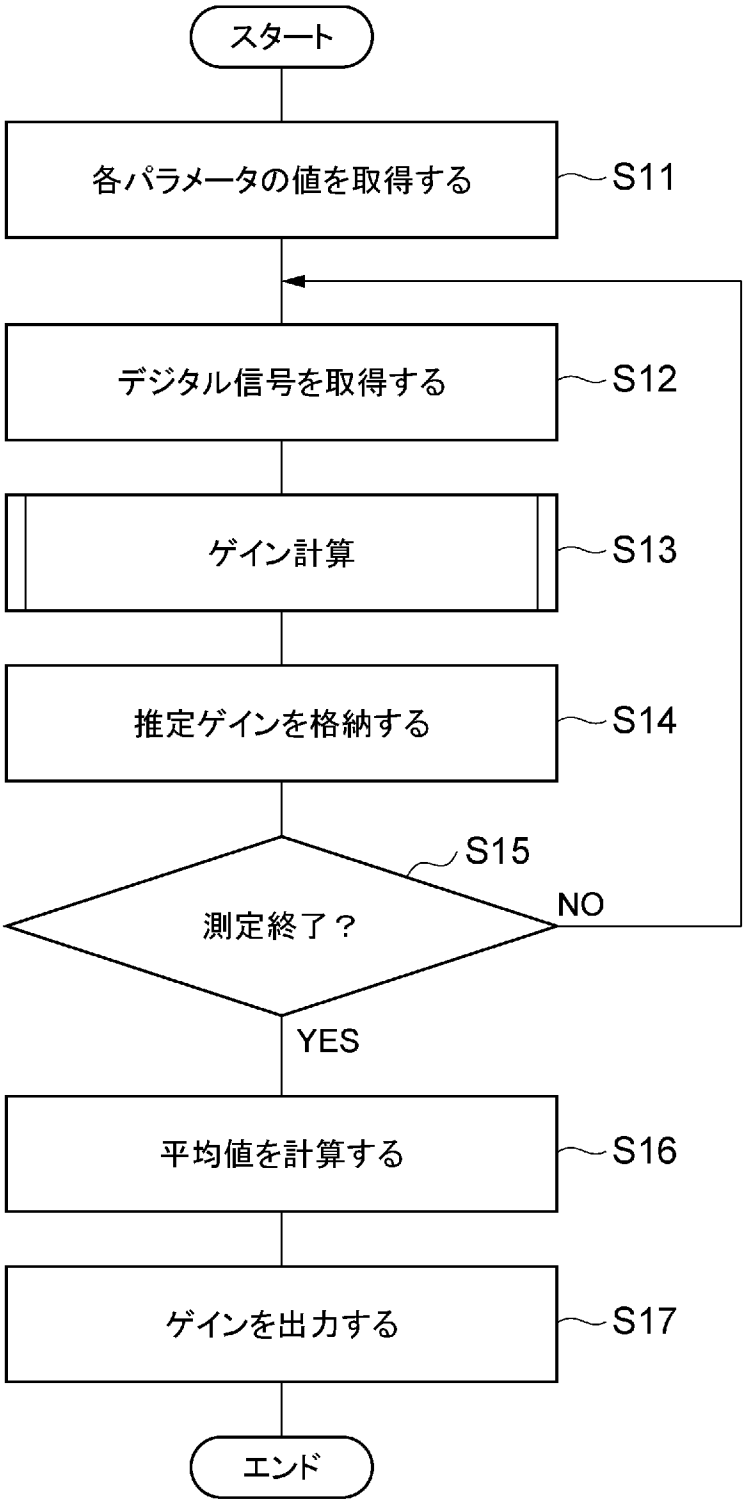
[図3]



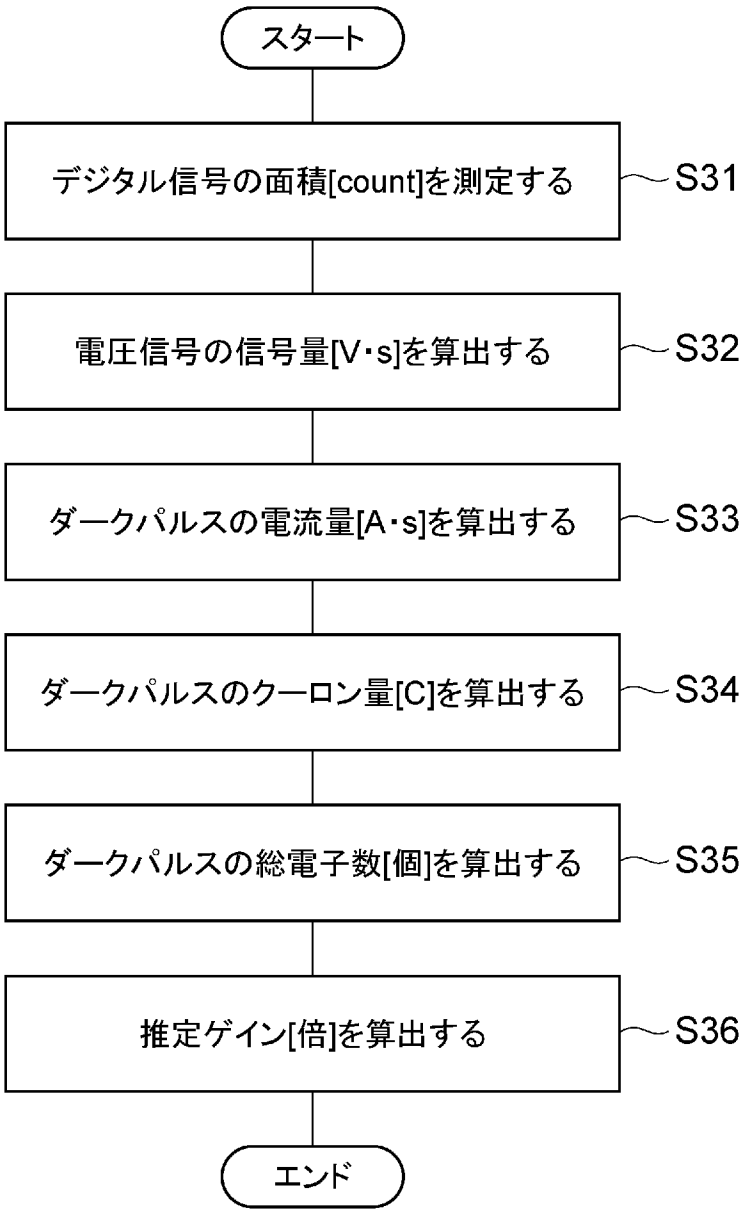
[図4]



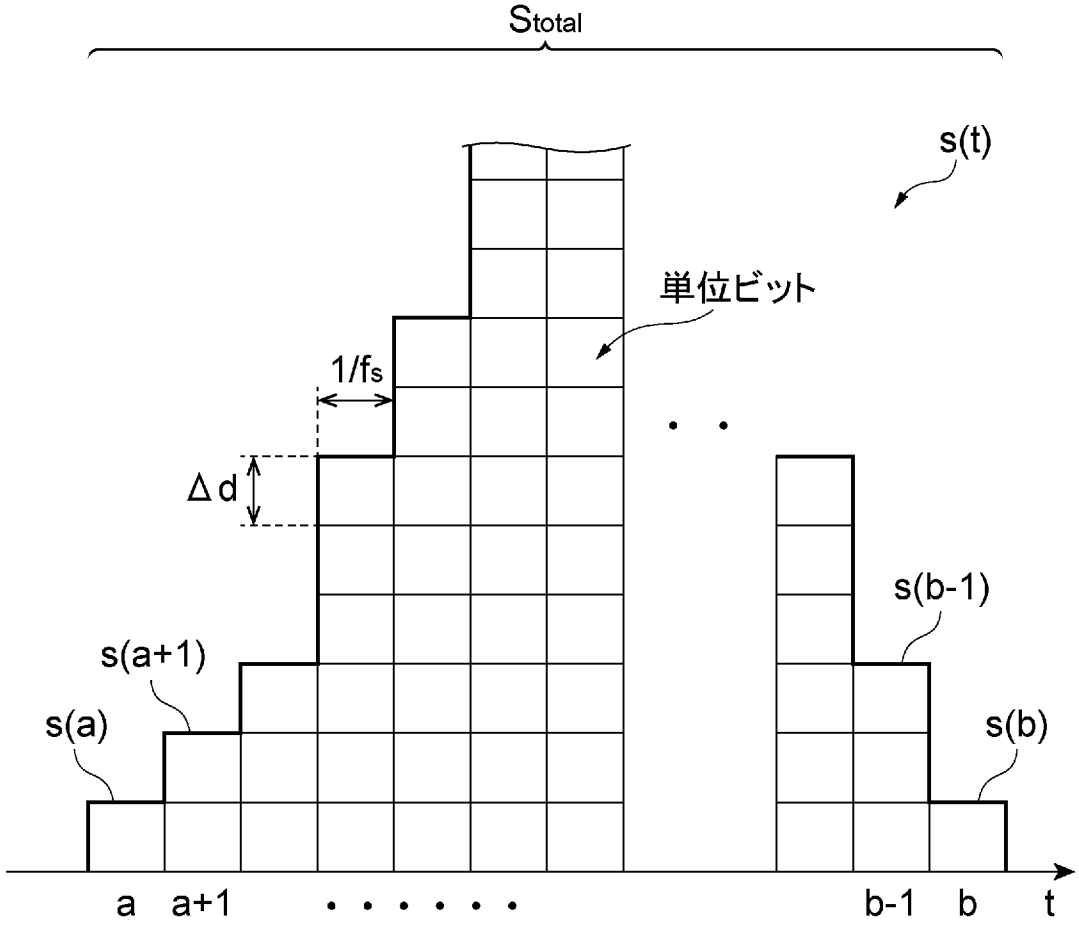
[図5]


スタート
各パラメータの値を取得する
S11
デジタル信号を取得する
S12
ゲイン計算
S13
推定ゲインを格納する
S14
S15
測定終了？
NO
YES
平均値を計算する
S16
ゲインを出力する
S17
エンド

[図6]


スタート
デジタル信号の面積[count]を測定する
S31
電圧信号の信号量[V・s]を算出する
S32
ダークパルスの電流量[A・s]を算出する
S33
ダークパルスのクーロン量[C]を算出する
S34
ダークパルスの総電子数[個]を算出する
S35
推定ゲイン[倍]を算出する
S36
エンド

[図7]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2022/011275

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01J 1/42(2006.01)i
FI: G01J1/42 G

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01J1/00-G01J1/60, G01J11/00, H01J43/04-H01J43/26

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2022
Registered utility model specifications of Japan 1996-2022
Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2000-275102 A (HAMAMATSU PHOTONICS KK) 06 October 2000 (2000-10-06)	1-7
A	CN 107526096 A (JIANGSU SUPERSENSE INSTRUMENT CO., LTD.) 29 December 2017 (2017-12-29)	1-7
A	WO 2019/102637 A1 (HAMAMATSU PHOTONICS KK) 31 May 2019 (2019-05-31)	1-7
A	CN 110968005 A (GUILIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 07 April 2020 (2020-04-07)	1-7
A	US 5548111 A (WALLAC OY) 20 August 1996 (1996-08-20)	1-7

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
17 May 2022	**31 May 2022**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2022/011275

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2000-275102 A	06 October 2000	US 6960771 B1	
		WO 2002/027283 A1	
		EP 1329699 A1	
CN 107526096 A	29 December 2017	(Family: none)	
WO 2019/102637 A1	31 May 2019	US 2020/0374478 A1	
		EP 3716613 A1	
		CN 111373738 A	
CN 110968005 A	07 April 2020	(Family: none)	
US 5548111 A	20 August 1996	(Family: none)	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2022/011275

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

G01J 1/42(2006.01)i
FI: G01J1/42 G

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

G01J1/00-G01J1/60, G01J11/00, H01J43/04-H01J43/26

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０２２年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２２年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２２年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	JP 2000-275102 A (浜松ホトニクス株式会社) 06.10.2000 (2000-10-06)	1-7
A	CN 107526096 A (JIANGSU SUPERSENSE INSTRUMENT CO., LTD.) 29.12.2017 (2017-12-29)	1-7
A	WO 2019/102637 A1 (浜松ホトニクス株式会社) 31.05.2019 (2019-05-31)	1-7
A	CN 110968005 A (GUILIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 07.04.2020 (2020-04-07)	1-7
A	US 5548111 A (WALLAC OY) 20.08.1996 (1996-08-20)	1-7

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
“&” 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
17.05.2022	31.05.2022

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
小澤　瞬 2W 6003

電話番号 03-3581-1101 内線 3258

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2022/011275

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2000-275102 A	06.10.2000	US 6960771 B1	
		WO 2002/027283 A1	
		EP 1329699 A1	
CN 107526096 A	29.12.2017	（ファミリーなし）	
WO 2019/102637 A1	31.05.2019	US 2020/0374478 A1	
		EP 3716613 A1	
		CN 111373738 A	
CN 110968005 A	07.04.2020	（ファミリーなし）	
US 5548111 A	20.08.1996	（ファミリーなし）	