



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
G01T 1/171 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2015142655, 28.02.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
28.02.2014

Дата регистрации:  
24.01.2018

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:  
08.03.2013 EP 13158382.5

(43) Дата публикации заявки: 13.04.2017 Бюл. № 11

(45) Опубликовано: 24.01.2018 Бюл. № 3

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на  
национальной фазе: 08.10.2015

(86) Заявка РСТ:  
EP 2014/053990 (28.02.2014)

(87) Публикация заявки РСТ:  
WO 2014/135465 (12.09.2014)

Адрес для переписки:  
129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр. 3, ООО  
"Юридическая фирма Городиский и Партнеры"

(72) Автор(ы):  
ЗОЛЬФ Торстен (NL)

(73) Патентообладатель(и):  
КОНИНКЛЕЙКЕ ФИЛИПС Н.В. (NL)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: WO 2008079445 A2, 03.07.2008.  
Frach T et al.: "The digital silicon  
photomultiplier - Principle of operation and  
intrinsic detector performance", 2009 IEEE  
Nuclear Science Symposium and Medical  
Imaging Conference (NSS/MIC 2009), Orlando,  
FL, USA, 24.10.2009, p. 1959-1965. WO  
2009112962 A2, 17.09.2009. RU 2473099 C2,  
20.01.2013.

## (54) ФОРМИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ МЕТОК ОБНАРУЖЕННЫХ КВАНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

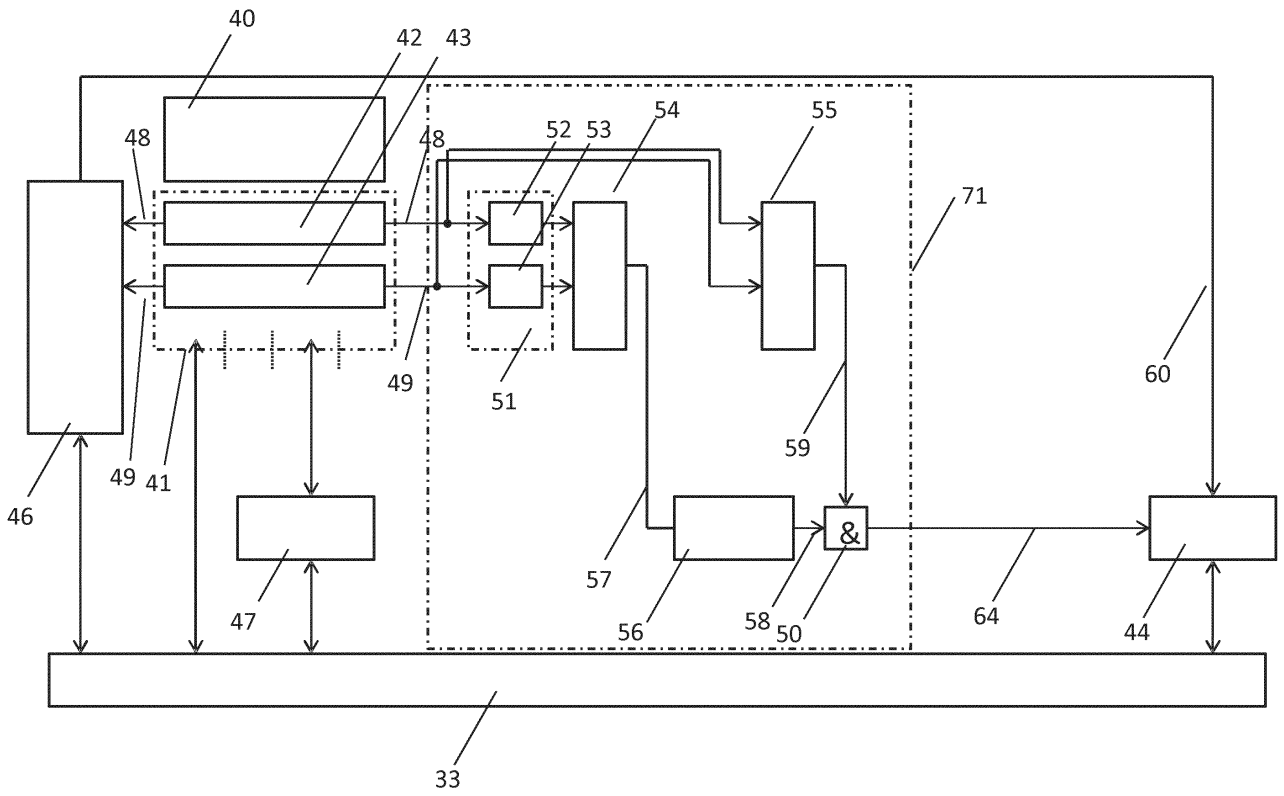
(57) Реферат:

Группа изобретений относится к формированию временных меток обнаруженных квантов излучения и находит применение в области физики частиц с высокой энергией. Устройство содержит пиксельную матрицу оптического детектора, блок срабатывания метки времени и блок синхронизации. Блок срабатывания метки времени определяет частоту срабатывания пиксельной ячейки для пиксельных

ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора. Блок срабатывания метки времени заставляет блок синхронизации формировать метку времени на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки. Технический результат – улучшение подавления шума при формировании временных меток обнаруженных квантов излучения в областях применения физики частиц с высокой энергией. 6 н. и 9 з.п. ф-лы, 5 ил.

RU 2 642 172 C2

RU 2 642 172 C2



Фиг. 4



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*G01T 1/171* (2006.01)

(21)(22) Application: **2015142655, 28.02.2014**

(24) Effective date for property rights:  
**28.02.2014**

Registration date:  
**24.01.2018**

Priority:

(30) Convention priority:  
**08.03.2013 EP 13158382.5**

(43) Application published: **13.04.2017** Bull. № 11

(45) Date of publication: **24.01.2018** Bull. № 3

(85) Commencement of national phase: **08.10.2015**

(86) PCT application:  
**EP 2014/053990 (28.02.2014)**

(87) PCT publication:  
**WO 2014/135465 (12.09.2014)**

Mail address:  
**129090, Moskva, ul. B. Spasskaya, 25, str. 3, OOO  
"Yuridicheskaya firma Gorodisskij i Partnery"**

(72) Inventor(s):  
**ZOLF Torsten (NL)**

(73) Proprietor(s):  
**KONINKLEJKE FILIPS N.V. (NL)**

(54) **FORMATION OF TIME MARKS OF DETECTED EMISSION QUANTA**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: group of inventions relates to the formation of the time marks of detected emission quanta and finds application in the field of high-energy particle physics. The device comprises a pixel array of the optical detector, a time mark operation unit, and a synchronization unit. The time mark operation unit determines the frequency of a pixel cell operation for pixel cells within the pixel matrix of the optical detector.

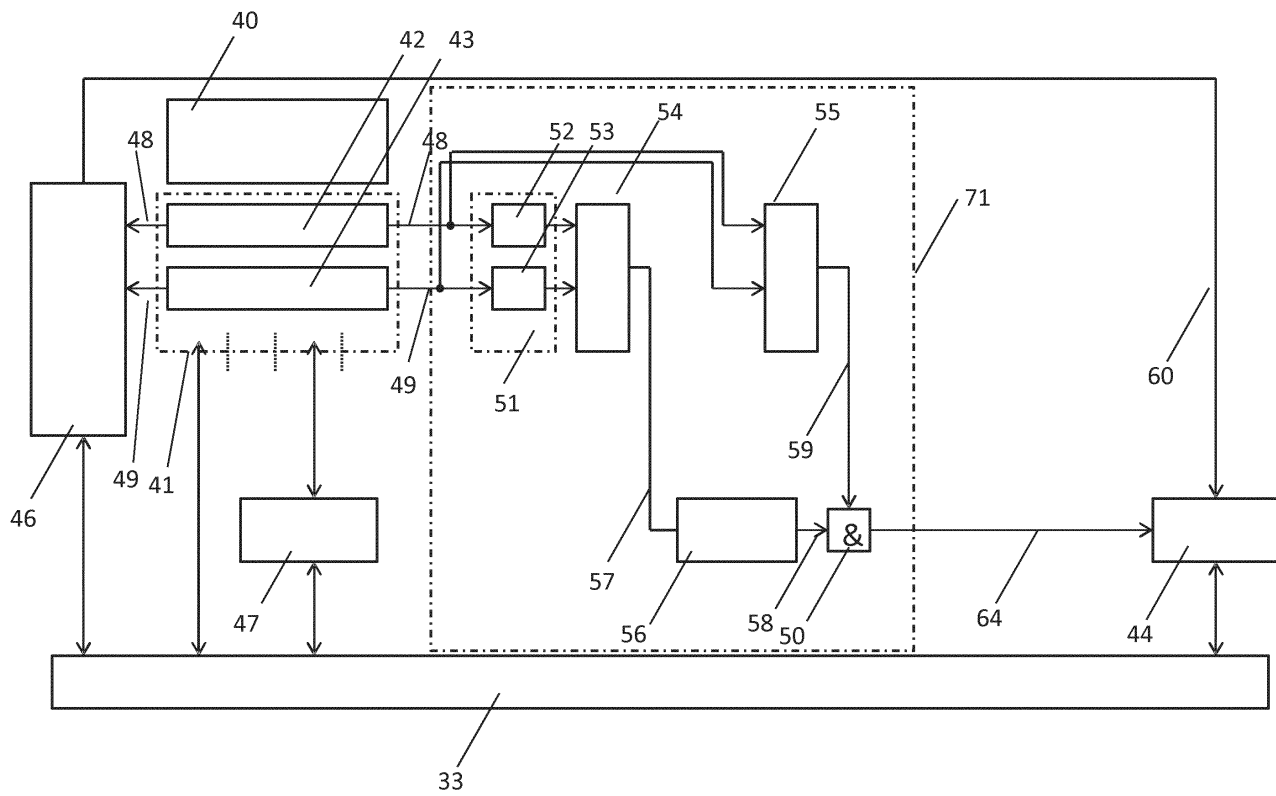
The time mark operation unit causes the synchronization unit to generate a time mark based on the frequency of the pixel cell operation.

EFFECT: improvement of noise suppression during generation of time marks of detected emission quanta in the fields of application of high energy particle physics.

15 cl, 5 dwg

RU 2 642 172 C2

RU 2 642 172 C2



Фиг. 4

## ОБЛАСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Настоящее изобретение относится к формированию временных меток обнаруженных квантов излучения и находит применение в области физики частиц с высокой энергией. Такие применения охватывают прямое обнаружение квантов излучения в виде  
5 оптических фотонов, таких как излучение Черенкова, а также косвенное обнаружение квантов излучения посредством оптических фотонов, произведенных элементом сцинтиллятора. Изобретение находит конкретное применение в системах формирования изображений позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), и, еще более конкретно, изобретение может использоваться во времяпролетных (ВП) системах формирования  
10 изображений ПЭТ.

## ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

При формировании изображений ПЭТ в объект, такой как пациент или животное, перед его помещением в область формирования изображений ПЭТ вводят радиофармпрепарат. Радиофармпрепарат предпочтительно поглощается областями  
15 объекта, и после периода усвоения получают изображение его распределения. Затем врач интерпретирует относительное усвоение (накопление) в конкретных областях на изображениях, таких как органы, и может поставить диагноз объекта.

Радиофармпрепарат претерпевает радиоактивный распад, что приводит к созданию позитронов. Каждое событие распада создает один позитрон, который проходит  
20 несколько миллиметров в человеческой ткани, где он затем взаимодействует с электроном в событии аннигиляции, которое создает два противоположно направленных гамма-фотона. Каждый из двух гамма-фотонов имеет энергию 511 кэВ, и затем их обнаруживают детекторами гамма-фотонов, расположенными радиально вокруг области получения ПЭТ-изображений, каждый из которых дает электрический сигнал,  
25 когда в него ударяется падающий гамма-фотон. В детекторе гамма-фотонов, который определен здесь как содержащий элемент сцинтиллятора, находящийся в оптической связи с оптическим детектором, элемент сцинтиллятора преобразовывает высокоэнергетический гамма-фотон в сцинтилляционный световой импульс, содержащий несколько оптических фотонов, а электрический сигнал генерируется оптическим  
30 детектором. Для каждого электрического сигнала блоком формирования меток времени выдается метка времени, которая сравнивается с другими метками времени в блоке определения совпадения. Два гамма-фотона идентифицируются как совпадающие, если их метки времени имеют место в пределах узкого временного интервала друг от друга; обычно, если они находятся в пределах  $\pm 3$  нс. Положения этих двух детекторов,  
35 принимающих совпадающие гамма-фотоны, определяют линию в пространстве, вдоль которой имело место событие аннигиляции, называемую линией ответа (LOR). Такие линии ответа затем реконструируются (воссоздаются) с получением изображения, иллюстрирующего распределение радиофармпрепарата в пределах области получения изображений. Во времяпролетной (ВП) ПЭТ небольшая разница во времени между  
40 двумя обнаруженными гамма-фотонами также используется для локализации положения вдоль линии ответа, в котором имело место событие аннигиляции, и, таким образом, улучшается пространственное разрешение реконструированного изображения. В ПЭТ глубины взаимодействия (ГВ) траектории двух обнаруженных гамма-фотонов могут быть также оценены для улучшения пространственного разрешения  
45 реконструированного изображения посредством уменьшения ошибок параллакса.

В системах формирования изображений ПЭТ в целом блок формирования меток времени, который выдает метки времени принятым гамма-фотонам, обычно включает в себя блок синхронизации, такой как преобразователь "время-цифровой код" (TDC) и

блок срабатывания метки времени. Блок срабатывания метки времени заставляет блок синхронизации формировать метку времени, указывающую на время приема каждого гамма-фотона, для последующего анализа блоком определения совпадения. Блок срабатывания метки времени заставляет блок синхронизации формировать метку  
5 времени, когда сигнал на его входе превышает заданный порог, и желательно, чтобы это происходило как можно скорее после обнаружения гамма-фотона, чтобы оптимизировать точность синхронизации системы формирования изображений ПЭТ.

Блок формирования меток времени, используемый для целей синхронизации при прямом обнаружении квантов излучения, таких как излучение Черенкова, работает  
10 почти таким же образом. Однако при обнаружении излучения Черенкова оптический детектор генерирует электрический сигнал непосредственно из обнаруженных квантов излучения, то есть в отсутствие элемента сцинтиллятора.

Ложное срабатывание блока синхронизации является проблемой, которая может возникнуть в системах, использующих так называемое прямое обнаружение, а также  
15 в системах, использующих косвенное обнаружение, таких как системы формирования изображений ПЭТ, и она является особенно острой в системах, которые используют в качестве оптического детектора детекторы с цифровым кремниевым фотоумножителем (Si-ФЭУ), работающим в режиме счетчика Гейгера. Цифровые детекторы с Si-ФЭУ страдают от шума темновых счетных импульсов, что проявляется как ложные  
20 электрические импульсы на выходе оптического детектора в отсутствие действительного события, такого как оптический импульс или принятый гамма-фотон. Электрические импульсы от шума темновых счетных импульсов часто неправильно интерпретируются блоком срабатывания метки времени и ложным образом заставляют блок синхронизации формировать метку времени. Такое ложное срабатывание приводит к периоду  
25 нечувствительности блока синхронизации, т.е. периоду времени, в течение которого блок синхронизации должен быть возвращен в исходное состояние (сброшен на ноль) и во время которого он не способен определять время приема действительных событий. Шум темновых счетных импульсов сильно зависит от температуры и даже при комнатных температурах может создать значительное время нечувствительности блока  
30 синхронизации.

Некоторое различие между шумом темновых счетных импульсов и сигналами от действительных событий может быть достигнуто посредством увеличения порога блока срабатывания метки времени. Однако это ограничивало преимущества из-за  
35 подвергаемой сомнению природы электрических импульсов, возникающих в результате шума темновых счетных импульсов, и из-за риска того, что некоторые действительные события не создают достаточно большой сигнал для срабатывания блока срабатывания метки времени. Пропуск действительных событий ухудшает чувствительность обнаружения. При формировании изображений ПЭТ это ухудшает соотношение сигнал/шум системы. Увеличение порога блока срабатывания метки времени имеет  
40 дополнительный недостаток увеличения задержки между приемом действительного события и временем его метки времени, тем самым ухудшая точность синхронизации блока формирования меток времени.

Также были внедрены два дополнительных способа смягчения эффектов шума темновых счетных импульсов: охлаждение оптического детектора и подтверждение  
45 срабатывания. Охлаждение оптического детектора уменьшает шум темновых счетных импульсов из-за его зависимости от температуры и обычно является требованием таких систем формирования изображений. Это требует присоединения массивного устройства охлаждения к оптическим детекторам, что неблагоприятно влияет на размер системы,

стоимость и требования по питанию. Подтверждение срабатывания также использовалось в контексте формирования изображений ПЭТ. При этом электрические сигналы от оптических детекторов, чувствительных к сцинтилляционным световым импульсам, получающимся из гамма-фотонов, используются для формирования сигнала подтверждения срабатывания, указывающего на то, что сигнал срабатывания произошел из-за гамма-фотона, а не шума темновых счетных импульсов. В известной схеме срабатывания, раскрытой в заявке на патент WO2006/111883A2, блок срабатывания метки времени заставляет блок синхронизации формировать метку времени, когда был обнаружен первый оптический фотон в сцинтилляционном световом импульсе. Схема подтверждения срабатывания выдает соответствующий сигнал подтверждения на основе логической операции И/ИЛИ нескольких таких сигналов оптического детектора, которая является истиной, когда заданное число таких сигналов оптического детектора впоследствии превышает порог. Подтвержденное срабатывание блока синхронизации после приема гамма-фотона характеризуется обнаружением его сцинтилляционного света во множественных оптических детекторах и вызывает истинный сигнал подтверждения, приводящий к выработке метки времени. В отличие от этого шум темновых счетных импульсов вызывает срабатывание меньшего количества оптических детекторов и вызывает ложный сигнал подтверждения, приводящий к подавлению метки времени и сбросу блока синхронизации.

Документ "The digital silicon photomultiplier - Principle of operation and intrinsic detector performance" («Цифровой кремниевый фотоумножитель - принцип работы и присущие характеристики детектора»), 2009 IEEE Nuclear science symposium and medical imaging conference (NSS/MIC 2009), Orlando, FL, USA, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 24 октября 2009, страницы 1959-1965, раскрывает полностью цифровую реализацию кремниевого фотоумножителя. Раскрытый датчик основан на фотодиоде ОФЛД, интегрированном в стандартном КМОП-процессе. Сбалансированная сеть срабатывания используется для распространения сигнала срабатывания ото всех ячеек к интегрированному преобразователю "время-цифровой код" (TDC).

Заявка на патент WO2006/111883A2 раскрывает детектор излучения, который включает в себя массив пикселей детектора, каждый из которых включает в себя матрицу ячеек детектора. Каждая ячейка детектора включает в себя фотодиод, смещенный в область пробоя, и цифровую схему, соединенную с фотодиодом и выполненную с возможностью выдавать первое цифровое значение в состоянии покоя и второе цифровое значение в ответ на обнаружение фотона фотодиодом. Цифровая схема срабатывания выполнена с возможностью выдавать сигнал срабатывания, указывающий на начало периода времени интеграции, в ответ на выбранное число из одной или более ячеек детектора, переходящих от первого цифрового значения ко второму цифровому значению.

Заявка на патент US2013/009063A1 раскрывает систему и способ определения начала гамма-взаимодействий для формирования изображений ПЭТ. Синхронизация последовательности первичных события срабатывания получается и используется для определения взвешенной комбинации, которая микширует информацию синхронизации от различных первичных событий срабатывания, чтобы вычислить общую временную характеристику событий срабатывания с улучшенным временным разрешением.

Заявка на патент US2013/020487A1 раскрывает способ работы ПЭТ-сканера, который определяет глубину взаимодействия аннигиляционных фотонов в пределах сцинтиллятора при локализации временной пары фотонов вдоль линии ответа (LOR).

Заявка на патент WO2008/079445A2 раскрывает установку ПЭТ, которая включает

в себя множество систем чувствительных к излучению детекторов и систем выборочного срабатывания. Системы выборочного срабатывания идентифицируют сигналы детектора, полученные в результате обнаруженного гамма-излучения, игнорируя ложные сигналы детектора. В одной реализации установка включает в себя преобразователь "время-цифровой код", который разделяет временной интервал измерения ( $T_{max}$ ) в соответствии с двоичным иерархическим разложением уровня  $N$ , где  $N$  является целым числом, большим или равным единице.

Заявка на патент US2011/095173A1 раскрывает детектор излучения, который включает в себя фотодатчик для приема света через вход и для отправки электрического импульса через выход в ответ на прием света. Детектор излучения также может включать в себя анализатор импульсов, чтобы отправлять индикатор счетчику импульсов, когда электрический импульс соответствует сцинтилляционному импульсу, и не отправлять индикатор счетчику импульсов, когда электрический импульс соответствует шумовому импульсу.

Однако эти решения по-прежнему страдают от того недостатка, что оптические детекторы должны быть охлаждены для уменьшения шума темновых счетных импульсов до допустимого уровня. Кроме того, высокий порог блока срабатывания метки времени ограничивает достижимое разрешение синхронизации.

### СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Задачей изобретения является улучшение подавления шума при формировании временных меток обнаруженных квантов излучения в областях применения физики частиц с высокой энергией. Дополнительной задачей изобретения является улучшение точности хронометража таких обнаруженных квантов излучения.

Эти задачи решаются посредством устройства обнаружения излучения, содержащего пиксельную матрицу оптического детектора, блок срабатывания метки времени и блок синхронизации. Также раскрыты система, способ и компьютерный программный продукт для решения этих задач. В устройстве обнаружения излучения пиксельная матрица оптического детектора содержит одну или более пиксельных ячеек, которые могут срабатывать под действием оптических фотонов. Блок срабатывания метки времени находится в функциональной связи с блоком синхронизации. Блок срабатывания метки времени принимает сигналы от пиксельной матрицы оптического детектора и выполнен с возможностью определять частоту срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора. В соответствии с первым аспектом изобретения блок срабатывания метки времени выполнен с возможностью вынуждать блок синхронизации формировать метку времени на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора. В предпочтительной реализации метка времени формируется, если частота срабатывания пиксельной ячейки превышает заданную частоту. В других рассмотренных реализациях метка времени формируется, если частота срабатывания пиксельной ячейки меньше заданной частоты, находится в пределах заданного диапазона от заданной частоты или равна заданной частоте. Это отличается от известного способа, в котором блок срабатывания метки времени заставляет блок синхронизации генерировать метку времени, когда обнаружен первый оптический фотон в сцинтилляционном световом импульсе. Подавление шума при хронометраже обнаруженных квантов излучения в целом улучшено посредством различения на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки, тем самым заставляющего блок синхронизации формировать метку времени, поскольку световые импульсы,



характеризующие их обнаружение, обычно имеют место в пределах короткого периода времени. Например, при формировании изображений ПЭТ сцинтилляционный световой импульс, полученный в результате приема гамма-фотона элементом сцинтиллятора, характеризуется высокой начальной частотой генерации оптических фотонов и, таким образом, высокой частотой срабатывания пиксельной ячейки, тогда как шум темновых счетных импульсов характеризуется срабатыванием пиксельных ячеек на более низкой частоте. В применениях так называемого прямого обнаружения также предполагается, что представляющий интерес первоначальный световой импульс происходит аналогично как короткий импульс оптических фотонов. Заставляя блок синхронизации формировать метку времени на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки, блок срабатывания метки времени обеспечивает улучшенное различие между электрическими сигналами, полученными из оптических фотонов, и электрическими сигналами, вызванными шумом темновых счетных импульсов. Поскольку блок синхронизации формирует метку времени только тогда, когда существует высокая вероятность, что электрические сигналы порождаются из-за оптических фотонов, уменьшается частота, с которой блок синхронизации сбрасывается после того, как он сработал для формирования метки времени под действием шума. Следовательно, подавление шума при формировании временных меток обнаруженных квантов излучения улучшается. Таким образом, свойственное блоку синхронизации время сброса после ложного срабатывания под действием шума происходит менее часто, и блок синхронизации доступен для формирования меток времени обнаружения оптических фотонов в течение большей доли времени. Дополнительным преимуществом, возникающим в результате снижения частоты ложного срабатывания блока синхронизации, является снижение требований к охлаждению оптического детектора. Это вызвано тем, что использующий изобретение блок синхронизации способен формировать метки времени в течение той же доли времени уже при более высокой температуре, чем существующие способы. При формировании изображений ПЭТ, например, вследствие высокой начальной частоты генерации оптических фотонов в элементе сцинтиллятора частота срабатывания также может быть оценена за короткий период времени, тем самым позволяя проводить быстрое различие между сцинтилляционным световым импульсом, полученным из-за приема гамма-фотона, и шумом темновых счетных импульсов. Это, кроме того, улучшает точность синхронизации. Еще одно преимущество, возникающее в результате срабатывания блока синхронизации на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки, состоит в том, что ее улучшенное подавление шума позволяет формировать метку времени после обнаружения меньшего количества оптических фотонов. Это позволяет уменьшить пороговый уровень блока срабатывания метки времени ближе к уровню шума оптического детектора, позволяя формировать метки времени после обнаружения, например, первого оптического фотона, тем самым улучшая временное разрешение блока формирования меток времени.

В соответствии с другим аспектом изобретения метка времени формируется, если частота срабатывания пиксельной ячейки превышает пороговое значение частоты. Различие шума темновых счетных импульсов, который обычно ведет к более низкой частоте срабатывания пиксельной ячейки, чем от оптического импульса в результате кванта излучения, улучшается при принятии решения о формировании метки времени на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки, превышающей пороговое значение частоты.

В соответствии с другим аспектом изобретения частота срабатывания пиксельной ячейки определяется посредством вычисления количества сработавших пиксельных

ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора в течение заданного периода задержки. Пиксельные ячейки могут представлять собой однофотонный лавинный детектор (ОФЛД), иначе известные как пиксельные ячейки с кремниевым фотоумножителем (Si-ФЭУ), которые имеют состояние цифрового выхода, которое  
5 соответствует тому, сработала ли пиксельная ячейка или нет. Таким образом, частота может быть определена посредством вычисления, то есть подсчета, количества пиксельных ячеек, которые сработали, а значит, установлены в состояние срабатывания, указывающее на обнаружение оптического фотона, в пределах заданного периода  
10 времени, называемого периодом задержки. Использование заданного периода задержки дает возможность различения сигналов от пиксельной матрицы оптического детектора на основе временного профиля сработавших пиксельных ячеек.

В соответствии с другим аспектом изобретения метка времени формируется на основе удовлетворения условия количества сработавших пиксельных ячеек перед тем, как  
удовлетворено условие частоты срабатывания пиксельной ячейки. Например, условия  
15 могут состоять в том, что количество сработавших пиксельных ячеек или частота срабатывания пиксельной ячейки превышает, меньше, находится в пределах заданного диапазона от или равно(а) заданному подсчитанному количеству или заданной частоте соответственно. Выгодным образом, подлинность сигналов от матрицы оптического  
детектора улучшается перед формированием метки времени, что приводит к  
20 улучшенному подавлению шума.

В соответствии с другим аспектом изобретения метка времени формируется, если подсчитанное количество сработавших пиксельных ячеек превышает пороговое значение  
счета перед тем, как частота срабатывания пиксельной ячейки превышает пороговое  
значение частоты. Кроме того, частота срабатывания пиксельной ячейки определяется  
25 посредством вычисления количества сработавших пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора в течение заданного периода задержки, который начинается, когда подсчитанное количество сработавших пиксельных ячеек превышает пороговое значение счета. Следовательно, метка времени формируется,  
если подсчитанное количество сработавших пиксельных ячеек превышает пороговое  
30 значение счета и затем впоследствии превышает более высокое значение счета до конца заданного периода задержки таким образом, что превышено пороговое значение частоты. Выгодным образом, подлинность сигналов от матрицы оптического детектора  
улучшается перед формированием метки времени, что приводит к улучшенному  
подавлению шума.

В соответствии с другим аспектом изобретения дополнительно предусмотрен блок  
регулировки метки времени, выполненный с возможностью принимать метку времени  
от блока синхронизации. Блок регулировки метки времени выполнен с возможностью  
формировать отрегулированную первую метку времени, указывающую на то время, в  
которое соблюдается заданное условие подсчитанного количества сработавших  
40 пиксельных ячеек, посредством вычитания заданного периода задержки из времени первой метки времени. Такое вычитание может быть осуществлено процессором, например, внутри блока управления. Выгодным образом, такая метка времени может  
более надежно сравниваться с другими метками времени, поскольку время метки  
времени указывает на надежную (достоверную) позицию на профиле сигналов от  
матрицы оптического детектора. Такая метка времени особенно полезна, например,  
45 при формировании изображений ПЭТ, при котором может быть более точно определено время обнаружения гамма-кванта.

В соответствии с другим аспектом изобретения блок срабатывания метки времени

заставляет блок синхронизации формировать метку времени дополнительно на основе второй частоты срабатывания пиксельной ячейки, определенной в более поздний момент времени. Такая система позволяет проводить улучшенное различие между электрическими сигналами и шумом темновых счетных импульсов, основываясь на  
5 решении о формировании метки времени по более точно определенному профилю частоты срабатывания пиксельной ячейки.

В соответствии с другим аспектом изобретения блок срабатывания метки времени заставляет блок синхронизации формировать метку времени, если первая частота срабатывания пиксельной ячейки превышает первую пороговую частоту, и вторая  
10 частота срабатывания пиксельной ячейки, определенная в более поздний момент времени, превышает вторую пороговую частоту. Такая система позволяет проводить еще более улучшенное различие сигналов, основываясь на решении о формировании метки времени по более точно определенному профилю оптического импульса. В особенности, это позволяет подавлять электрические импульсы от сцинтилляционных  
15 световых импульсов, которые имеют неподходящую энергию, чтобы указывать на действительное сцинтилляционное событие.

В соответствии с другим аспектом изобретения предусмотрен второй блок синхронизации, и блок срабатывания метки времени дополнительно выполнен с возможностью вынуждать второй блок синхронизации формировать метку времени,  
20 указывающую на время обнаружения одного или более оптических фотонов пиксельными ячейками в пределах пиксельной матрицы оптического детектора. Информация синхронизации, указывающая на время обнаружения этих одного или более оптических фотонов, может использоваться для дополнительного повышения уверенности в том, что сигналы от пиксельной матрицы оптического детектора получены  
25 из действительного сигнала, позволяя проводить различие на основе более точно определенного профиля оптического импульса. Такая информация может использоваться, например, системой формирования изображений ПЭТ, чтобы отклонять очевидно совпадающие по времени кванты, которые, судя по их профилю оптического импульса, являются на практике результатом рассеивания.

В соответствии с другим аспектом изобретения предусмотрен второй блок синхронизации, и блок срабатывания метки времени выполнен с возможностью вынуждать второй блок синхронизации формировать метку времени, указывающую  
30 на время, в которое частота срабатывания пиксельной ячейки удовлетворяет заданному условию частоты срабатывания. Условие частоты срабатывания, например, может состоять в том, что частота срабатывания пиксельной ячейки превышает, меньше,  
35 находится в пределах заданного диапазона от или равна заданной частоте. Информация о частоте срабатывания, обеспеченная вторым блоком синхронизации, может использоваться для дополнительного повышения уверенности, с которой сигналы от матрицы оптического детектора определяются как указывающие на действительное  
40 событие, такое как прием кванта излучения.

В соответствии с другим аспектом изобретения раскрыта система формирования изображений ПЭТ. Система формирования изображений ПЭТ содержит множество устройств обнаружения излучения в соответствии с предыдущими аспектами, и каждое устройство обнаружения излучения дополнительно содержит элемент сцинтиллятора,  
45 находящийся в оптической связи с пиксельной матрицей оптического детектора. Улучшенные устройства обнаружения излучения выгодным образом улучшают качество изображения в системе формирования изображений ПЭТ.

В соответствии с другим аспектом изобретения раскрыта система формирования

изображений ПЭТ. Система формирования изображений ПЭТ содержит множество устройств обнаружения излучения в соответствии с аспектами изобретения, имеющих по меньшей мере второй блок синхронизации. Каждое устройство обнаружения излучения дополнительно содержит элемент сцинтиллятора, находящийся в оптической связи с пиксельной матрицей оптического детектора. Система формирования изображений ПЭТ дополнительно содержит блок вычисления глубины взаимодействия; причем блок вычисления глубины взаимодействия выполнен с возможностью вычислять глубину взаимодействия кванта излучения в элементе сцинтиллятора на основе разности во времени между первой меткой времени, сформированной первым блоком метки времени, и второй меткой времени, сформированной вторым блоком метки времени. Глубина взаимодействия может быть определена из справочной таблицы или по статистической функции, связывающей соотношением разности во времени с глубиной взаимодействия в элементе сцинтиллятора. Такая справочная таблица или статистическая функция могут быть созданы по эвристической или модельной информации о разности во времени на основании геометрии элемента сцинтиллятора. Такое вычисление может быть осуществлено процессором. Такая информация может использоваться, например, системой формирования изображений ПЭТ, чтобы отклонять очевидно совпадающие по времени кванты, которые, судя по их траектории, являются на практике результатом рассеивания.

В соответствии с другим аспектом изобретения раскрыта система формирования изображений ПЭТ. Система формирования изображений ПЭТ содержит множество устройств обнаружения излучения в соответствии с аспектами изобретения, имеющих по меньшей мере второй блок синхронизации. Каждое устройство обнаружения излучения дополнительно содержит элемент сцинтиллятора, находящийся в оптической связи с пиксельной матрицей оптического детектора. Система формирования изображений ПЭТ дополнительно содержит блок корректировки метки времени; причем блок корректировки метки времени выполнен с возможностью вычислять скорректированную метку времени на основе взвешенного среднего первой метки времени, сформированной первым блоком синхронизации, и второй метки времени, сформированной вторым блоком синхронизации. Взвешенное среднее может быть определено из справочной таблицы или статистической функции, относящейся к разностям во времени между метками времени, и обеспечивает более точную метку времени на основе двух входных меток времени. Такая справочная таблица или статистическая функция могут быть созданы из эвристических или модельных меток времени на основании геометрии элемента сцинтиллятора. Такое вычисление может быть осуществлено процессором. Такая информация может использоваться, например, системой формирования изображений ПЭТ, чтобы уменьшить дрожание синхронизации.

В соответствии с другим аспектом изобретения предложен способ синхронизации. Способ синхронизации может использоваться, например, при формировании изображений ПЭТ или формировании изображений на основе излучения Черенкова. Способ синхронизации содержит этапы i) приема сигналов от пиксельной матрицы оптического детектора, указывающих на срабатывание одной или более пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора, ii) определения по меньшей мере первой частоты срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора и iii) формирования первой метки времени, указывающей на обнаружение кванта излучения, на основе по меньшей мере первой частоты срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы

оптического детектора. Способ синхронизации может необязательно включать в себя дополнительные этапы способов, раскрытые в соответствии с другими аспектами изобретения.

5 В соответствии с другим аспектом изобретения раскрыт компьютерный программный продукт, содержащий исполняемые компьютером команды для выполнения этапов способа в соответствии с аспектом способа синхронизации по изобретению.

Компьютерный программный продукт может содержаться на машиночитаемом носителе данных, таком как гибкий диск, магнитный жесткий диск, USB-накопитель, оптический диск, постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) или оперативное запоминающее  
10 устройство (ОЗУ), и, кроме того, исполняемые компьютером команды могут быть загружаемыми.

В соответствии с другим аспектом изобретения в устройстве обнаружения излучения блок синхронизации является преобразователем "время-цифровой код". Преобразователь "время-цифровой код" обычно предлагает улучшенную временную точность по  
15 сравнению с аналоговым преобразователем времени, что улучшает точность хронометража обнаружения квантов излучения.

В соответствии с другим аспектом изобретения в устройстве обнаружения излучения пиксельные ячейки в пределах пиксельной матрицы оптического детектора являются пиксельными ячейками с кремниевым фотоумножителем (Si-ФЭУ). Такие пиксельные  
20 ячейки имеют быстрый отклик и обеспечивают хорошую точность синхронизации, когда используются при обнаружении квантов излучения.

В соответствии с другим аспектом изобретения в устройстве обнаружения излучения частота срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора определена в пределах  
25 временного интервала в диапазоне от 0,001 нс до 200 нс. Такой временной интервал дает возможность быстрого различения между шумом темновых счетных импульсов и сцинтилляционным импульсом, полученным из кванта излучения.

В соответствии с другим аспектом изобретения в устройстве обнаружения излучения частота срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек в пределах матрицы оптического детектора определена в пределах временного  
30 интервала в диапазоне от 0,001 нс до 200 нс после обнаружения одного или более оптических фотонов пиксельными ячейками в пределах пиксельной матрицы оптического детектора. Обнаружение конкретного числа оптических фотонов до определения частоты делает возможным срабатывание от заданной точки в профиле оптического импульса, тем самым обеспечивая повторимые рабочие характеристики синхронизации.  
35

В соответствии с другим аспектом изобретения устройство обнаружения излучения дополнительно включает в себя логический блок подтверждения. Блок подтверждения выполнен с возможностью принимать сигналы от пиксельной матрицы оптического детектора и дополнительно выполнен с возможностью определять количество  
40 сработавших пиксельных ячеек в пределах по меньшей мере участка пиксельной матрицы оптического детектора. Логический блок подтверждения выполнен с возможностью формировать сигнал подтверждения, указывающий на действительную метку времени, на основе количества сработавших пиксельных ячеек в пределах этого участка пиксельной матрицы оптического детектора. Количество сработавших пиксельных ячеек, например, может быть определено посредством последовательного сдвига  
45 цифровых состояний пиксельных ячеек в матрице пиксельных ячеек в параллельный сумматор. Посредством обеспеченного подтверждения такая конфигурация выгодным образом улучшает различение между сцинтилляционным световым импульсом и шумом

темновых счетных импульсов.

### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Фигура 1 иллюстрирует множество детекторов гамма-фотонов в соответствии с некоторыми аспектами изобретения.

5 Фигура 2 показывает примерную систему формирования изображений ПЭТ в соответствии с некоторыми аспектами изобретения.

Фигура 3 иллюстрирует схему синхронизации уровня техники, используемую в системе формирования изображений ПЭТ Philips Digital Photon Counting (PDPC).

10 Фигура 4 иллюстрирует первый вариант осуществления блока синхронизации и блока срабатывания метки времени в соответствии с некоторыми аспектами изобретения.

Фигура 5 иллюстрирует второй вариант осуществления блока синхронизации и блока срабатывания метки времени в соответствии с некоторыми аспектами изобретения.

### ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

15 Чтобы улучшить подавление шума при формировании временных меток обнаруженных квантов излучения в областях применения физики частиц с высокой энергией, предложено настоящее изобретение, содержащее устройство обнаружения излучения. Также предложены система, способ и компьютерный программный продукт. Устройство обнаружения излучения содержит пиксельную матрицу оптического детектора, блок срабатывания метки времени и блок синхронизации и описано со  
20 ссылкой на обнаружение гамма-фотонов в системе формирования изображений ПЭТ. Конкретная ссылка сделана на реализацию, в которой блок синхронизации является преобразователем "время-цифровой код" (TDC), хотя следует понимать, что в качестве альтернативы могут использоваться другие формы блока синхронизации, такие как аналоговый блок синхронизации. Также следует понимать, что изобретение также  
25 находит применение в более широкой области физики частиц с высокой энергией, в том числе, например, в прямом обнаружении излучения Черенкова.

При формировании изображений ПЭТ обнаружение гамма-фотонов осуществляется множеством детекторов гамма-фотонов. Такие детекторы гамма-фотонов обычно  
30 расположены вокруг области получения ПЭТ-изображений, чтобы принимать из нее гамма-фотоны. При работе каждый детектор гамма-фотонов, содержащий элемент сцинтиллятора, находящийся в оптической связи с оптическим детектором, отвечает на прием гамма-фотона созданием сцинтилляционного светового импульса в элементе сцинтиллятора. Оптический детектор, который может быть пиксельной матрицей оптического детектора, содержащей одну или более пиксельных ячеек, которые могут  
35 быть срабатывать под действием оптических фотонов, отвечает на обнаружение оптических фотонов посредством генерирования электрических сигналов. Процесс хронометража приема гамма-фотонов является фундаментальным для формирования изображений ПЭТ, при котором положения возникновения гамма-фотонов определяются через совпадение. Этот процесс хронометража обычно выполняется  
40 одним или более блоками формирования меток времени, причем блок формирования меток времени присваивает метки времени принятым гамма-фотонам. Блок синхронизации и блок срабатывания метки времени по настоящему изобретению находят применение в рамках блока формирования меток времени системы формирования изображений ПЭТ, в которой они совместно работают для формирования меток  
45 времени, соответствующих времени обнаружения каждого гамма-фотона. В настоящем изобретении блок срабатывания метки времени выполнен с возможностью принимать электрические сигналы от пиксельной матрицы оптического детектора и дополнительно выполнен с возможностью определять по меньшей мере первую частоту срабатывания

пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора. Кроме того, блок срабатывания метки времени выполнен с возможностью заставлять блок синхронизации формировать метку времени на основе по меньшей мере первой частоты срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора. Следовательно, метка времени формируется на основе первой частоты срабатывания пиксельной ячейки, а значит, на основе частоты (скорости) обнаружения оптических фотонов.

Фиг. 1 иллюстрирует множество детекторов гамма-фотонов в соответствии с некоторыми аспектами изобретения. На фиг. 1 показано множество детекторов 1 гамма-фотонов, причем каждый детектор гамма-фотонов содержит элемент 2a, 2b, 2c или 2d сцинтиллятора, находящийся в оптической связи с соответствующей пиксельной матрицей 3a, 3b, 3c или 3d оптического детектора. Для простоты иллюстрации на фиг. 1 показаны только четыре детектора 1 гамма-фотонов, и следует понимать, что конструкция может быть повторена, чтобы принимать гамма-фотоны от увеличенной области приема. Множество детекторов 1 гамма-фотонов, например, может быть расположено вокруг области получения изображения системы формирования изображений ПЭТ. Для простоты иллюстрации элементы 2a, 2b, 2c, 2d сцинтиллятора на фиг. 1 проиллюстрированы как отделенные от соответствующей им пиксельной матрицы 3a, 3b, 3c, 3d оптического детектора; однако на практике поверхность 5 примерного элемента 2a сцинтиллятора и поверхность 6 соответствующей ему пиксельной матрицы 3a оптического детектора могут находиться в тесном контакте или быть оптически связаны посредством согласующего коэффициенты преломления слоя с тем, чтобы обеспечить оптическую связь между ними. Кроме того, на фиг. 1 отдельные элементы сцинтиллятора, представленные в качестве примера номерами 2a, 2b, 2c, 2d, оптически изолированы друг от друга посредством отражающих и светобарьерных слоев 7, 8, чтобы предотвратить проникновение сцинтилляционных световых импульсов между соседними элементами сцинтиллятора. Такие отражающие и светобарьерные слои 7, 8 также могут использоваться на всех поверхностях элементов 2a, 2b, 2c, 2d сцинтиллятора, кроме оптического интерфейса с пиксельной матрицей оптического детектора, показанной на фиг. 1. Таким образом, сцинтилляционный свет, сгенерированный внутри элемента сцинтиллятора, удерживается в пределах этого элемента сцинтиллятора до тех пор, пока он не будет обнаружен соответствующей ему пиксельной матрицей оптического детектора. При работе детектор гамма-фотонов, представленный в качестве примера элементом 2a сцинтиллятора и соответствующей ему пиксельной матрицей 3a оптического детектора, показанной затененной на фиг. 1, реагирует на прием квантов излучения, таких как гамма-фотон 10. Гамма-фотон 10 может быть одним из пары противоположно направленных гамма-фотонов 10, 13, образовавшихся вследствие события аннигиляции после радиоактивного распада, причем радиоактивный распад производит позитрон 14, который аннигилируется электроном 15. Источником радиоактивного распада может быть, например, радиофармпрепарат. Прием гамма-фотона 10 элементом 2a сцинтиллятора приводит к генерации сцинтилляционного света 11, который удерживается в пределах элемента 2a сцинтиллятора посредством сочетания полного внутреннего отражения и отражающих слоев 7, 8 до тех пор, пока не произойдет его обнаружение пиксельной матрицей 3a оптического детектора, что дает в результате электрические сигналы на электрическом выводе 12a матрицы. Пиксельная матрица 3a оптического детектора содержит один или более пикселей 6 оптического детектора, показанных как затененные

темным цветом на фиг. 1, причем каждый пиксель 6 оптического детектора содержит одну или более пиксельных ячеек 9. Таким образом, самым маленьким элементом оптического детектора является пиксельная ячейка 9, которая, например, может представлять собой кремниевый фотоумножитель (Si-ФЭУ), подсоединенный в режиме

5

Фиг. 2 демонстрирует примерную систему формирования изображений ПЭТ в соответствии с некоторыми аспектами изобретения. Примерные детекторы 1 гамма-фотонов по фиг. 1 могут, например, использоваться в системе, проиллюстрированной на фиг. 2. На фиг. 2 система 20 формирования изображений ПЭТ содержит множество

10 модулей детекторов гамма-фотонов или, в частности, модулей 24, 25 детекторов гамма-фотонов, расположенных вокруг области 21 получения изображения. Каждый модуль 24, 25 детекторов гамма-фотонов может содержать один или более детекторов гамма-фотонов, таких как детектор гамма-фотонов, образованный сочетанием элементов 2а и 3а на фиг. 1. Каждый детектор гамма-фотонов в пределах модуля 24, 25 детекторов

15 гамма-фотонов производит электрические сигналы, указывающие на прием гамма-фотонов, электрические сигналы от которых принимаются блоком 28 формирования меток времени через шину. Хотя блок 28 формирования меток времени проиллюстрирован как единый блок, он может быть тиражирован таким образом, что один или более блоков формирования меток времени связаны с каждым модулем 24

20 детектора гамма-фотонов, тем самым локально придавая функциональность формирования меток времени детектору гамма-фотонов, в котором принимается гамма-фотон. При работе обнаружение примерных гамма-фотонов 22, 23 модулями 24, 25 детекторов гамма-фотонов соответственно дает электрические сигналы, которые принимаются блоком 28 формирования меток времени через шину 26 и шину 27

25 соответственно. Каждая шина 26, 27 представляет собой один или более электрических выводов 12а, 12b, 12с, 12d матрицы на фиг. 1 упомянутых одного или более детекторов гамма-фотонов в пределах каждого модуля 24, 25 детекторов гамма-фотонов. Возвращаясь к фиг. 2, блок 28 формирования меток времени выдает по меньшей мере метку времени, указывающую на время приема каждого принятого гамма-фотона. В

30 состав блока 28 формирования меток времени может быть дополнительно включен блок интеграции для интегрирования сцинтилляционного света, относящегося к каждому гамма-фотону, чтобы определить его энергию. Блок 28 формирования меток времени связан с блоком 29 определения совпадения, который идентифицирует принятые гамма-фотоны как совпадающие, если их метки времени имеют место в пределах узкого

35 временного интервала друг от друга, обычно +/-3 нс. Блок 29 определения совпадения может дополнительно анализировать энергию, относящуюся к каждому принятому гамма-фотону, и отклонять очевидно совпадающие гамма-фотоны, которые имеют энергию гамма-фотона, лежащую за пределами заданного энергетического окна. Блок 29 определения совпадения связан с процессором 30 реконструкции, который строит

40 линию ответа для каждой пары принятых фотонов, считающихся совпадающими, и далее обрабатывает множество таких линий ответа, чтобы реконструировать данные, представляющие изображение положений возникновения совпадающих гамма-фотонов. При времяпролетной (ВП) ПЭТ процессор реконструкции может дополнительно учитывать небольшую разницу во времени между принятыми совпадающими гамма-фотонами, чтобы лучше локализовать положение их возникновения. При ПЭТ глубины взаимодействия (ГВ) могут быть дополнительно оценены траектории двух

45 обнаруженных гамма-фотонов, чтобы улучшить пространственное разрешение реконструированного изображения посредством уменьшения ошибок параллакса.



Процессор 30 реконструкции дополнительно связан с блоком 31 обработки изображений, который выполнен с возможностью обрабатывать данные, представляющие положения возникновения совпадающих фотонов, в формат, подходящий для представления изображения на устройстве вывода. Блок 31 обработки изображений дополнительно связан с устройством 32 вывода, которое представляет изображение, таким как дисплей, принтер и т.п. Блок 33 управления связан со всеми описанными блоками системы формирования изображений ПЭТ и координирует описанные выше операции.

При использовании участок изучаемого объекта, такой как участок тела человека или животного, помещается в область 21 получения изображения примерной системы формирования изображений ПЭТ на фиг. 2. Участок может представлять собой орган внутри объекта, в котором желательно измерить усвоение (накопление) радиофармпрепарата. Перед расположением участка объекта в области 21 получения изображения радиофармпрепарат может быть введен в объект, и можно позволить истечь периоду усвоения. Во время процесса получения изображения множество детекторов 1 гамма-фотонов принимают гамма-фотоны, получающиеся в результате событий радиоактивного распада в пределах области 21 получения изображения, например, из-за распада радиофармпрепарата, введенного в объект. После процесса получения изображения система 20 формирования изображений ПЭТ дает изображение, указывающее на распределение радиофармпрепарата в пределах области 21 получения изображения. Блок синхронизации и блок срабатывания метки времени по настоящему изобретению находят применение в блоке 28 формирования меток времени на фиг. 2.

Чтобы подчеркнуть выгоды настоящего изобретения, фиг. 3 иллюстрирует схему синхронизации уровня техники, используемую в системе формирования изображений ПЭТ Philips Digital Photon Counting (PDPC) (цифрового подсчета фотонов Philips). Такая система раскрыта в заявке на патент WO2006/111883A2. На фиг. 3 уровня техники элемент 40 сцинтиллятора находится в оптической связи с пиксельной матрицей 41 оптического детектора с образованием детектора гамма-фотонов. В проиллюстрированной на фиг. 2 системе 20 формирования изображений ПЭТ может использоваться множество таких детекторов гамма-фотонов. Возвращаясь к фиг. 3 уровня техники, сцинтилляционный свет, генерируемый в пределах элемента 40 сцинтиллятора, обнаруживается пиксельными ячейками в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора. Пиксельная матрица 41 оптического детектора содержит один или более пикселей оптического детектора, причем каждый пиксель оптического детектора содержит одну или более пиксельных ячеек. Пиксельная ячейка может представлять собой однофотонный лавинный детектор (ОФЛД), иначе известный как кремниевый фотоумножитель (Si-ФЭУ), и может эксплуатироваться в режиме счетчика Гейгера. При работе Si-ФЭУ или пиксельная ячейка первоначально сбрасывается таким образом, что ее выход находится в логическом состоянии "ложь". Прием оптического фотона таким Si-ФЭУ приводит пробоем его перехода и запуску логического состояния "истина" на его выходе. Таким образом, наименьшим элементом оптического детектора в пиксельной матрице 41 оптического детектора является пиксельная ячейкой, причем каждая пиксельная ячейка может быть включена и выключена индивидуально, и ее логический выход может быть считан. В одной конфигурации пиксель оптического детектора имеет шаг приблизительно 4 мм, а пиксельная ячейка имеет шаг приблизительно 50 микронов. Таким образом, пиксель оптического детектора может содержать тысячи пиксельных ячеек, хотя также предусмотрены реализации с одной или более пиксельными ячейками. Пиксельные ячейки в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора размещены по строкам, как в качестве примера

проиллюстрировано строками 42, 43 пиксельных ячеек, из которых для простоты иллюстрации показаны только две. Могут иметься одна или более таких строк пиксельных ячеек. Логическая операция ИЛИ (не показано) далее выполняется над выходами одной или более пиксельных ячеек в строке 42, 43 пиксельных ячеек и используется для генерации сигнала срабатывания строки на выходах 48, 49 срабатывания строки. Поэтому выход 48, 49 срабатывания строки устанавливается в логическое состояние "истина", когда одна или более пиксельных ячеек в их строке 42, 43 пиксельных ячеек сработала, перейдя в логическое состояние "истина". В качестве примерной ссылки на фиг. 1, элемент 40 сцинтиллятора соответствует элементу 2а; пиксельная матрица 41 оптического детектора соответствует элементу 3а.

Возвращаясь к фиг. 3 уровня техники, блок синхронизации, реализованный как преобразователь 44 "время-цифровой код" (TDC), формирует метку времени, указывающую на время приема гамма-фотона элементом 40 сцинтиллятора, будучи запущенным логическим блоком 45 срабатывания. Выход 60 подтверждения логического блока 46 подтверждения управляет выводом метки времени блоку 33 управления, так что если электрические сигналы на выходах 48, 49 срабатывания строки оказываются результатом гамма-фотона, то метка времени выдается блоку 33 управления, а если нет, то метка времени не выдается и TDC сбрасывается. Может использоваться необязательный блок 47 интегратора для определения энергии каждого принятого гамма-фотона посредством интегрирования полученного в ответ на его прием сцинтилляционного света. Энергия гамма-фотона является полезным параметром в таких применениях, как формирование изображений ПЭТ, при котором блок определения совпадения может использовать ее для улучшения различения между рассеянными и нерассеянными гамма-фотонами и тем самым определять правильность линии ответа. Необязательный блок 47 интегратора может быть выполнен с возможностью генерировать сигнал, указывающий на общее количества сцинтилляционных световых импульсов, обнаруженных пиксельными ячейками в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора. Интегрирование блоком 47 интегратора может быть инициировано через блок 33 управления, когда логический блок 45 срабатывания заставляет TDC 44 сформировать метку времени. Необязательный блок 33 управления может координировать различные описанные выше операции, может также принимать метки времени от TDC 44 и дополнительно может управлять их передачей в блок 29 определения совпадения в пределах системы 20 формирования изображений ПЭТ, проиллюстрированной на фиг. 1.

При работе прием гамма-фотона элементом 40 сцинтиллятора на фиг. 3 уровня техники приводит к генерации сцинтилляционного светового импульса, содержащего большое число оптических фотонов. Оптические фотоны обнаруживаются пиксельными ячейками в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора, что дает в результате логическое состояние "истина" на выходах 48, 49 срабатывания строки, если одна или более пиксельных ячеек в соответствующей им строке 42, 43 пиксельных ячеек обнаруживает (регистрирует) оптический фотон. Сцинтилляционные световые импульсы характеризуются обнаружением их оптических фотонов пиксельными ячейками из множественных строк 42, 43 пиксельных ячеек и поэтому характеризуются логическим состоянием "истина" на множественных выходах 48, 49 срабатывания строки. Логический блок 45 срабатывания выполняет логическую операцию над множественными выходами 48, 49 срабатывания строки для того, чтобы генерировать сигнал на соединении 64 срабатывания TDC, что заставляет TDC 44 сформировать метку времени, когда выполнено заданное логическое условие. Обычно желательно формировать метку

времени, когда как можно меньше выходов 48, 49 срабатывания строки находятся в логическом состоянии "истина", чтобы оптимизировать чувствительность обнаружения. Поэтому самый низкий порог срабатывания достигается посредством конфигурирования логического блока 45 срабатывания как логического блока ИЛИ, в котором соединение  
5 64 срабатывания TDC заставляет TDC 44 формировать метку времени, когда один или более выходов 48, 49 срабатывания строки находятся в логическом состоянии "истина". Такая конфигурация соответствует формированию метки времени при обнаружении первого оптического фотона. В качестве альтернативы, более высокие пороги с улучшенным подавлением шума темновых счетных импульсов также могут быть  
10 достигнуты посредством реализации логического блока 45 срабатывания с комбинацией логических операций И и ИЛИ, имеющей в качестве входов заданный выбор выходов 48, 49 срабатывания строки.

Логический блок 46 подтверждения на фиг. 3 уровня техники включает в себя логическую схему, которая принимает сигналы от выходов 48, 49 срабатывания строки,  
15 указывающие на обнаружение оптических фотонов в строках 42, 43 пиксельных ячеек, чтобы определить, возникли ли эти сигналы из-за гамма-фотона. Логический блок 46 подтверждения генерирует сигнал "истина" на выходе 60 подтверждения, когда заданное число выходов 48, 49 срабатывания строки в пиксельной матрице 41 оптического  
20 детектора установлены в состояние "истина", указывающее на обнаружение одного или более оптических фотонов пиксельными ячейками в соответствующей строке 42, 43 пиксельных ячеек. Пороговое число пиксельных ячеек, требуемое для изменения состояния выхода 60 подтверждения, выше, чем требуемое логическим блоком 45 срабатывания, чтобы вынудить TDC 44 сформировать метку времени. Таким образом, логический блок 46 подтверждения обеспечивает различие шума, который обычно  
25 устанавливает в состояние "истина" низкое общее число пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора, и сцинтилляционного светового импульса, который устанавливает в состояние "истина" намного более высокое общее число пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора. Если логический блок 46 подтверждения подтверждает, что заданное число выходов  
30 48, 49 срабатывания строки было установлено в состояние "истина", сцинтилляционный световой импульс интерпретируется как происходящий из-за гамма-фотона, и выход 60 подтверждения заставляет TDC 44 выдать метку времени блоку 33 управления. Метка времени, которая была произведена при срабатывании логического блока 45 срабатывания, затем передается блоку 33 управления от регистра (не показан). Если  
35 логический блок 46 подтверждения не подтверждает, что заданное число выходов 48, 49 срабатывания строки было установлено в состояние "истина", то метка времени не передается блоку 33 управления, и TDC 44 и блок 47 интегратора сбрасываются посредством блока 33 управления.

Как указано ранее, недостатком оптических детекторов Si-ФЭУ является высокий  
40 шум темновых счетных импульсов, свойственный их работе в режиме счетчика Гейгера. При использовании в детекторе гамма-фотонов, таком как проиллюстрированный на фиг. 3 уровня техники, электрические сигналы на выходах 48, 49 срабатывания строки, вызванные шумом темновых счетных импульсов, имеют характеристики, подобные электрическим сигналам, получающимся в результате обнаружения гамма-фотона, и  
45 это вносит путаницу в различие между ними. Поэтому шум темновых счетных импульсов в пиксельных ячейках в пределах строк 42, 43 пиксельных ячеек может привести к тому, что логический блок 45 срабатывания заставляет TDC 44 формировать метку времени и некорректно установить выход 60 подтверждения логического блока

46 подтверждения в состоянии "истина", тем самым вынуждая TDC 44 выдавать метку времени блоку 33 управления. В этом случае TDC 44 сбрасывается при подготовке к формированию следующей метки времени. В системе уровня техники по фиг. 3 сброс TDC занимает приблизительно 50 нс. Следовательно, ложное срабатывание TDC 44 приводит к "периоду нечувствительности" приблизительно 50 нс, во время которого он не может формировать метку времени. Шум темновых счетных импульсов в таких оптических детекторах, используемых при формировании изображений ПЭТ, как оказалось, достигает 10 миллионов импульсов в секунду при комнатной температуре, поэтому, когда логический блок 45 срабатывания сконфигурирован на запуск TDC 44 с его самым низким порогом, а значит, после обнаружения первого оптического фотона, период нечувствительности составляет 50%. Следовательно, TDC 44 не способен выдавать метки времени в течение 50% времени, что ухудшает чувствительность к гамма-фотонам. В системе уровня техники, проиллюстрированной на фиг. 3, различение шума обеспечивается через пороги по числу выходов 48, 49 срабатывания строки, которые требуются для того, чтобы вынуждать и логический блок 45 срабатывания, и логический блок 46 подтверждения соответственно иметь состояния выхода "истина". Несмотря на это, оптические детекторы также должны охлаждаться для уменьшения шума темновых счетных импульсов, чтобы его прерывания не мешали хронометражу гамма-фотонов.

В настоящем изобретении применен другой подход к улучшению подавления шума при хронометраже обнаруженных квантов излучения. В настоящем изобретении блок синхронизации, в качестве примера представленный как TDC, заставляют формировать метку времени посредством блока срабатывания метки времени на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки в пределах пиксельной матрицы оптического детектора, а значит, на основе частоты обнаружения оптических фотонов. Автор изобретения обнаружил, что, заставляя блок синхронизации формировать метку времени на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки, удастся обеспечивать улучшенное различение между срабатыванием пиксельных ячеек под действием оптических фотонов и шума темновых счетных импульсов. Следовательно, уменьшается частота, с которой шум темновых счетных импульсов заставляет блок синхронизации формировать метку времени, и уменьшается доля времени, в течение которого блок синхронизации неработоспособен ввиду иницированного шумом периода нечувствительности. Поэтому блок синхронизации способен формировать метку времени приема гамма-фотонов в течение большей доли времени. Улучшенное полезное использование времени блока синхронизации выгодным образом ослабляет требования к охлаждению оптических детекторов. Снижение активности блока синхронизации также уменьшает его собственное потребление мощности, тем самым уменьшая температуру соседних оптических детекторов, что дополнительно уменьшает их шум темновых счетных импульсов. Кроме того, такой улучшенный способ синхронизации улучшил точность хронометража, что улучшает разрешение изображения при использовании в системе формирования изображений ПЭТ.

В отличие от этого, система на фиг. 3 уровня техники выполнена таким образом, что блок синхронизации, реализованный посредством TDC 44, формирует метку времени, когда сработало заданное количество пиксельных ячеек оптического детектора.

Фиг. 4 иллюстрирует первый вариант осуществления блока синхронизации и блока 71 срабатывания метки времени в соответствии с некоторыми аспектами изобретения. На фиг. 4 элемент 40 сцинтиллятора оптической связан с пиксельной матрицей 41 оптического детектора с образованием детектора гамма-фотонов. Сцинтилляционный

световой импульс, генерируемый в пределах элемента 40 сцинтиллятора, обнаруживается пиксельной матрицей 41 оптического детектора. В проиллюстрированной на фиг. 2 системе 20 формирования изображений ПЭТ может использоваться множество таких детекторов гамма-фотонов. Оптические фотоны, например, от излучения Черенкова могут быть непосредственно обнаружены таким же образом, хотя и в отсутствие элемента 40 сцинтиллятора. Пиксельная матрица 41 оптического детектора содержит один или более пикселей оптического детектора, каждый из которых содержит одну или более пиксельных ячеек. Пиксельная ячейка может быть однофотонным лавинным детектором (ОФЛД), иначе известным как кремниевый фотоумножитель (Si-ФЭУ), и может эксплуатироваться в режиме счетчика Гейгера, в котором прием оптического фотона приводит к пробоею перехода и логическому состоянию "истина" на выходе пиксельной ячейки. При работе Si-ФЭУ или пиксельная ячейка первоначально сбрасывается таким образом, что ее выход находится в логическом состоянии "ложь". Прием оптического фотона Si-ФЭУ приводит к пробоею перехода, тем самым запуская изменение ее выхода на логическое состояние "истина". Таким образом, наименьшим элементом оптического детектора в пиксельной матрице 41 оптического детектора является пиксельная ячейка, причем каждая пиксельная ячейка может быть включена и выключена индивидуально, и ее логический выход может быть считан. В одной конфигурации пиксель оптического детектора имеет шаг приблизительно 4 мм, а пиксельные ячейки размещены в строках с шагом приблизительно 50 микронов. Поэтому пиксель оптического детектора может содержать тысячи пиксельных ячеек, хотя также предусмотрены реализации с одной или более ячейками. Пиксельные ячейки в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора могут быть размещены в строках, как в качестве примера проиллюстрировано строками 42, 43 пиксельных ячеек на фигуре 4, на которой для простоты иллюстрации показаны только две строки. Могут иметься одна или более таких строк пиксельных ячеек. Логическая операция ИЛИ (не показана) затем выполняется над выходами одной или более пиксельных ячеек в строке 42, 43 пиксельных ячеек и используется для генерирования сигнала срабатывания строки на выходах 48, 49 срабатывания строки. Поэтому выход 48, 49 срабатывания строки устанавливается в логическое состояние "истина", когда одна или более пиксельных ячеек в его строке 42, 43 пиксельных ячеек находятся в логическом состоянии "истина". В качестве примерной ссылки на фиг. 1, элемент 40 сцинтиллятора соответствует элементу 2а; пиксельная матрица 41 оптического детектора соответствует элементу 3а. Возвращаясь к фиг. 4, блок синхронизации, пример которого проиллюстрирован как TDC 44, формирует метку времени, указывающую на время приема гамма-фотона элементом 40 сцинтиллятора, когда логический элемент 50 И создает логическое состояние "истина" на соединении 64 срабатывания TDC. Для реализации блока синхронизации также может использоваться альтернативный блок синхронизации, такой как аналоговый блок синхронизации. Блок 51 укорачивания импульса содержит одну или более моностабильных схем 52, 53, каждая из которых выполнена с возможностью принимать электрические сигналы от строки 42, 43 пиксельных ячеек и генерировать выходной импульс "логическая истина", когда сигнал на соответствующем ей выходе 48, 49 срабатывания строки указывает, что одна или более пиксельных ячеек в соответствующей ей строке 42, 43 пиксельных ячеек были переведены в состояние "истина", указывающее на обнаружение оптического фотона. Период моностабильного импульса может находиться в диапазоне от 0,001 нс до 10 нс, предпочтительно находится в диапазоне от 0,001 нс до 5 нс, еще более предпочтительно находится в диапазоне от 0,001 нс до 1 нс, а наиболее предпочтительно находится в

диапазоне от 0,001 нс до 0,5 нс. Таким образом, моностабильная схема 52, 53 генерирует выходной импульс "логическая истина", когда единственный оптический фотон был обнаружен пиксельной ячейкой в соответствующей ей строке 42, 43 пиксельных ячеек. Электрические выходы моностабильных схем 52, 53 в блоке 51 укорачивания импульса затем соединяются с первичным логическим блоком 54 срабатывания. Выход 57 первичного логического блока 54 срабатывания выполнен с возможностью выдавать логическое состояние "истина", когда соблюдается заданное условие срабатывания. В одной реализации первичный логический блок 54 срабатывания выполняет логическую операцию ИЛИ, так что его выход 57 заставляет блок 56 задержки генерировать выходной импульс "логическая истина" в точке 58 через фиксированное время, определяемое периодом задержки блока 56 задержки, после того как любая из моностабильных схем в блоке 51 укорачивания импульса удовлетворяет своему пороговому условию. Таким образом, блок 56 задержки выполнен с возможностью генерировать выходной импульс "логическая истина" через фиксированное время после того, как обнаружен единственный фотон в любой из пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора. В другой реализации первичный логический блок 54 срабатывания может содержать любую комбинацию логических элементов, которая заставляет выход 57 находится в логическом состоянии "истина", когда пороговое условие для моностабильных схем 52, 53 в блоке 51 укорачивания импульса соблюдается для любого заданного выбора пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора. Таким образом, блок 56 задержки может быть выполнен с возможностью генерировать выходной импульс "логическая истина" на выходе 58 через фиксированный период задержки, определяемый периодом задержки блока 56 задержки, после того, как любое число  $n$  оптических фотонов будет обнаружено пиксельными ячейками в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора. Таким образом, выходной импульс "логическая истина" создается через фиксированный период задержки после того, как обнаружен  $n$ -ый оптический фотон, или после того, как сработала  $n$ -ая пиксельная ячейка. Если в течение периода задержки блока 56 задержки выход 59 вторичного логического блока 55 срабатывания затем устанавливается в состояние "истина", то выход 64 логического элемента 50 И заставляет TDC сформировать метку времени. Поскольку время метки времени определяется тем временем, в которое был обнаружен  $n$ -ый оптический фотон или сработала  $n$ -ая пиксельная ячейка плюс период задержки блока 56 задержки, время, в которое обнаружен  $n$ -ый оптический фотон или сработала  $n$ -ая пиксельная ячейка, может быть определено посредством вычитания периода задержки блока 56 задержки из времени метки времени. Это имеет полезное применение при формировании изображений ПЭТ в улучшении воспроизводимости хронометрических измерений.

Вторичный логический блок 55 срабатывания принимает электрические сигналы от одного или более выходов 48, 49 срабатывания строки. Его выход 59 предназначен находиться в логическом состоянии "истина", когда соблюдается заданное логическое условие для выходов 48, 49 срабатывания строки. Это условие может соответствовать, например, тому, что частота срабатывания пиксельной ячейки превышает заданную частоту, меньше заданной частоты, находится в пределах заданного диапазона от заданной частоты или равна заданной частоте. Таким образом, метка времени формируется на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки. В одной реализации вторичный логический блок 55 срабатывания выполнен с возможностью генерировать сигнал "логическая истина" на выходе 59, когда общее количество выходов 48, 49 срабатывания строки в логическом состоянии "истина" превышает заданное число,

которое больше, чем то, которое заставляет первичный логический блок 54 срабатывания устанавливать свой выход 54 в логическом состоянии "истина".

Количество выходов 48, 49 срабатывания строки, требуемое для установки выхода 59 вторичного логического блока срабатывания в логическое состояние "истина", например, может быть равно двум или более. Период задержки в блоке 56 задержки определяет тот период времени, во время которого определяется частота срабатывания пиксельной ячейки. Частота срабатывания пиксельной ячейки определяется посредством вычисления разности между пороговым количеством сработавших пиксельных ячеек, требуемым для установки вторичного логического блока 55 срабатывания в состояние "истина", и требуемым для установки первичного логического блока 54 срабатывания в состояние "истина", в течение периода задержки блока 56 задержки. Например, установка порога по количеству пиксельных ячеек, требуемому для установки выхода 57 первичного логического блока 54 срабатывания в логическом состоянии "истина", равным одному, установка количества пиксельных ячеек, требуемого для установки выхода 59 вторичного логического блока 55 срабатывания в логическое состояние "истина", равным двум и установка периода задержки блока 56 задержки равным 100 пикосекундам (пс) приводят к пороговой частоте срабатывания пиксельной ячейки в одну сработавшую пиксельную ячейку за 100 пс, что соответствует одному оптическому фотону за 100 пс. Пиксельные ячейки в строках 42, 43 пиксельных ячеек могут быть сброшены после выхода 57 первичного логического блока 54 срабатывания или после выхода 64 логического элемента 50 И, чтобы подготовить пиксели в пиксельной матрице 41 оптического детектора к формированию следующей метки времени. Таким образом, в конце периода задержки, выход 58 блока 56 задержки заставляет TDC 44 сформировать метку времени, когда частота срабатывания пиксельной ячейки в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора превышает заданную частоту, а значит, когда частота обнаружения оптических фотонов превышает заданную частоту. Кроме того, в этой конфигурации время метки времени соответствует тому времени, в которое сработала первая пиксельная ячейка плюс период задержки блока 56 задержки, что позволяет проводить последующее вычисление времени обнаружения первой сработавшей пиксельной ячейки. В более общем случае, посредством регулировки порога или диапазона количества пиксельных ячеек, требуемого для установки выхода 57 первичного логического блока 54 срабатывания в логическое состояние "истина", и аналогичной регулировки, которая требуется для установки выхода 59 вторичного логического блока 55 срабатывания в логическое состояние "истина", метка времени может быть сформирована после удовлетворения других условий на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки. Ясно, что по меньшей мере одна пиксельная ячейка должна сработать для того, чтобы первичный логический блок 54 срабатывания установил свой выход в высокое состояние. Однако, в дополнение к описанному выше условию частоты срабатывания пиксельной ячейки, кроме того, для формирования метки времени может быть сделано условием предшествующее обнаружение порогового количества сработавших пиксельных ячеек посредством регулировки условия для первичного логического блока 54 срабатывания на установку его выхода в логическое состояние "истина". Таким образом, время метки времени является периодом задержки блока 56 задержки после удовлетворения входного условия для первичного логического блока 54 срабатывания. Таким образом, схема на фиг. 4 может быть выполнена с возможностью формировать метку времени, соответствующую времени обнаружения n-го оптического фотона плюс период задержки блока 56 задержки, причем метка времени является условной в зависимости от начального обнаружения n запущенных

оптических фотонов и последующего удовлетворения условию частоты срабатывания пиксельной ячейки. Такая реализация выгодным образом улучшает подавление шума посредством формирования метки времени на основе профиля обнаруженных оптических фотонов.

5 Период импульса для моностабильных схем в блоке 51 укорачивания пульса на фиг. 4 желателно является более коротким, чем период задержки блока 56 задержки, чтобы предотвратить наложение импульса срабатывания на входах в первичный логический блок 54 срабатывания. Предпочтительно, период задержки блока 56 задержки делают  
 10 максимально коротким, чтобы быстро провести различие между шумом темновых счетных импульсов и электрическими сигналами, указывающими на прием гамма-фотона. Улучшенные характеристики синхронизации были обнаружены по всей следующей серии диапазонов в течение периода задержки в блоке 56 задержки: диапазон от 0,001 нс до 200 нс, диапазон от 0,001 нс до 20 нс, диапазон от 0,001 нс до 10 нс, диапазон от 0,001 нс до 1 нс. При сравнении с уровнем техники улучшенное различение  
 15 шума обеспечивается посредством схемы синхронизации, в качестве примера проиллюстрированной на фиг. 4, поскольку метка времени не формируется, если частота срабатывания пиксельной ячейки и, таким образом, частота обнаружения оптических фотонов не удовлетворяют заданному условию частоты. Извлечено преимущество из того наблюдения, что частота обнаружения оптических фотонов более заметно  
 20 отличается для шума и для действительного сцинтилляционного светового импульса, полученного из-за обнаружения гамма-фотона, чем общее количество пиксельных ячеек, которые срабатывают в каждом случае.

Как указано, конфигурация на фиг. 4 может быть адаптирована таким образом, что первый оптический фотон, произведенный гамма-фотоном, инициирует логический  
 25 элемент 50 И, и при условии, что в течение периода задержки блока 56 задержки частота генерации оптических фотонов в элементе 40 сцинтиллятора впоследствии достаточна, чтобы вынудить вторичный логический блок 55 срабатывания находиться в логическом состоянии "истина", метка времени генерируется посредством TDC 44. Поэтому время обнаружения первого оптического фотона может быть определено посредством  
 30 вычитания периода задержки блока 56 задержки из времени метки времени.

Конфигурация также может быть адаптирована таким образом, что n-ый оптический фотон инициирует логический элемент 50 И через блок 56 задержки, и таким образом, что k или больше оптических фотонов, где k превышает n, устанавливают вторичный логический блок 55 срабатывания в логическое состояние "истина". Таким образом,  
 35 метка времени формируется во время, определяемое периодом задержки после обнаружения n-го оптического фотона, при условии, что превышено условие частоты, определяемой (k - n) оптических фотонов за промежуток времени, определяемый периодом задержки. Пороговая частота обнаружения оптических фотонов, требуемая для формирования метки времени, может быть отрегулирована через i) период задержки  
 40 блока 56 задержки, ii) пороговое количество пиксельных ячеек, которые должны быть установлены в логическое состояние "истина", чтобы вызвать срабатывание каждой моностабильной схемы в блоке 51 укорачивания пульса, iii) пороговое количество пиксельных ячеек, которые должны быть установлены в логическое состояние "истина", чтобы вызвать изменение на выходе первичного логического блока 54 срабатывания,  
 45 или iv) пороговое количество пиксельных ячеек, которые должны быть установлены в логическое состояние "истина", чтобы вызвать изменение на выходе вторичного логического блока 55 срабатывания. Увеличение пороговой частоты обнаружения оптических фотонов, требуемой для формирования метки времени, в целом уменьшает



восприимчивость к ложному срабатыванию TDC под действием шума темновых счетных импульсов. Чрезмерное увеличение пороговой частоты уменьшает чувствительность к сцинтилляционным световым импульсам, получающимся из-за гамма-фотонов, поскольку некоторые световые импульсы будут пропущены.

5 В одной примерной реализации система на фиг. 4 выполнена таким образом, что первый оптический фотон инициирует логический элемент 50 И через первичный логический блок 54 срабатывания, а вторичный логический блок 55 срабатывания выполнен с возможностью вынуждать логический элемент 50 И заставлять TDC 44 формировать метку времени на более высоком уровне срабатывания, то есть, когда  
10 большее число оптических фотонов впоследствии обнаружено в течение периода задержки блока 56 задержки. Типичный материал элемента сцинтиллятора, LYSO, дает приблизительно 2000 фотонов в ответ на прием единственного гамма-фотона с 511 кэВ. Они появляются за время высвечивания приблизительно 40 нс в LYSO и приводят к начальному потоку оптических фотонов в 50 фотонов/нс. Значительное различие шума может быть обеспечено посредством установки блока 56 задержки на период задержки, равный 1 нс, и в этом случае выход 59 вторичного логического блока 55 срабатывания должен быть выполнен с возможностью находиться в логическом состоянии "истина", когда обнаруженный поток фотонов превышает приблизительно 5 фотонов/нс.

20 Необязательный логический блок 46 подтверждения на фиг. 4 включает в себя логическую схему, которая принимает сигналы от выходов 48, 49 срабатывания строки, указывающие на обнаружение оптических фотонов в строках 42, 43 пиксельных ячеек, чтобы определить, произошли ли эти сигналы из-за гамма-фотона. Таким образом, необязательный логический блок 46 подтверждения может быть выполнен с  
25 возможностью генерировать сигнал "истина" на выходе 60 подтверждения, когда заданное количество выходов 48, 49 срабатывания строки в пиксельной матрице 41 оптического детектора было установлено в состояние "истина", указывающее на обнаружение одного или более оптических фотонов пиксельными ячейками в соответствующей строке 42, 43 пиксельных ячеек. Пороговое количество пиксельных ячеек, требуемое для изменения состояния выхода 60 подтверждения, предпочтительно  
30 устанавливаются на более высокое число, чем требуемое логическим блоком 45 срабатывания, чтобы вынуждать TDC 44 генерировать метку времени. Таким образом, логический блок 46 подтверждения может использоваться для дополнительного различения шума, который обычно устанавливает малое общее число пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора в состояние "истина", и сцинтилляционного светового импульса, полученного в результате приема гамма-фотона элементом 40 сцинтиллятора, который устанавливает намного большее общее число пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора в состояние "истина". Если необязательный логический блок 46 подтверждения  
40 подтверждает, что заданное количество выходов 48, 49 срабатывания строки было установлено в состояние «истина», сцинтилляционный световой импульс интерпретируется как происходящий из-за гамма-фотона, и выход 60 подтверждения заставляет TDC 44 выдать метку времени блоку 33 управления. Метка времени, которая была произведена при срабатывании логического блока 45 срабатывания, затем  
45 передается блоку 33 управления из регистра (не показан). Если необязательный логический блок 46 подтверждения не подтверждает, что заданное количество выходов 48, 49 срабатывания строки было установлено в состояние "истина", то метка времени не передается блоку 33 управления, и TDC 44 и блок 47 интегратора сбрасываются

посредством блока 33 управления.

Предпочтительно, заданное количество выходов 48, 49 срабатывания строки, требуемое для установки выхода необязательного логического блока 46 подтверждения в достоверное состояние, является таким, что выход 60 истинного подтверждения формируется в ответ на сцинтилляционный световой импульс в пределах приблизительно 10 нс от сигнала "логическая истина" на соединении 64 срабатывания. Таким образом, если шум заставляет TDC 44 формировать метку времени, то его сброс может быть инициирован в пределах 10 нс, то есть, без слишком долгой задержки.

Необязательный блок 47 интегратора на фиг. 4 может использоваться для определения энергии каждого принятого гамма-фотона посредством интегрирования полученных в ответ на его прием сцинтилляционных световых импульсов. Энергия каждого гамма-фотона является параметром, который может использоваться в областях применения физики высоких энергий, таких как формирование изображений ПЭТ, при котором он может использоваться блоком определения совпадения для улучшения различения между рассеянными и нерассеянными гамма-фотонами, чтобы тем самым определять действительность линии ответа от совпадающих по времени гамма-фотонов. Блок 47 интегратора, таким образом, может быть выполнен с возможностью генерировать сигнал, указывающий на общее количество сцинтилляционных световых импульсов, обнаруженных пиксельными ячейками в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора. Интеграция может быть выполнена посредством периодического переноса логического выхода пиксельных ячеек в строках 42, 43 пиксельных ячеек в блок 47 интегратора мультиплексным способом и суммирования числа пиксельных ячеек с логическим состоянием "истина". Интеграция блоком 47 интегратора может быть инициирована посредством блока 33 управления, когда логический блок 45 срабатывания заставляет TDC 44 сформировать метку времени.

Необязательный блок 33 управления на фиг. 4 может координировать различные описанные выше операции и может дополнительно принимать метки времени от TDC 44 и затем управлять их передачей блоку 29 определения совпадения в пределах системы 20 формирования изображений ПЭТ, проиллюстрированной на фиг. 1.

Фиг. 5 иллюстрирует второй вариант осуществления блока синхронизации и блока срабатывания метки времени в соответствии с некоторыми аспектами изобретения. Вариант осуществления на фиг. 5 предназначен формировать метку времени после соблюдения как первого условия частоты срабатывания пиксельной ячейки, так и последующего соблюдения второго условия частоты срабатывания пиксельной ячейки. Улучшенное подавление шума обеспечено требованием, чтобы условия частоты срабатывания соблюдались в последовательные моменты времени, прежде чем будет сформирована метка времени. Это дает возможность формирования метки времени на основе профиля частоты обнаружения оптических фотонов сцинтилляционных световых импульсов. Таким образом, блок синхронизации, реализованный посредством примерного TDC 44, не запускается, пока нет еще более высокой вероятности того, что электрические сигналы от пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора получены в результате сцинтилляционного света. Это предотвращает период нечувствительности, связанный со сбросом блока синхронизации после того, как он вынужден сформировать метку времени под действием шума. Как и при первом варианте осуществления, проиллюстрированном на фиг. 4, следует понимать, что блок синхронизации, реализованный посредством примерного TDC 44, может быть в качестве альтернативы реализован другим блоком синхронизации, таким как аналоговый блок синхронизации.

В дополнение к элементам, изображенным на фиг. 4, фиг. 5 включает в себя третичный логический блок 63 срабатывания, который принимает электрические сигналы от одного или более выходов 48, 49, 67, 68 срабатывания строки. Его выход 69 предназначен находиться в логическом состоянии "истина", когда количество пиксельных ячеек, сработавших в течение периода задержки, определяемого блоком 61 задержки, удовлетворяет заданному условию счета; таким образом, частота срабатывания пиксельной ячейки удовлетворяет заданному условию частоты, как ранее описано со ссылкой на фиг. 4. Выход 69 третичного логического блока 63 срабатывания на фиг. 5 может быть предназначен находиться в логическом состоянии "истина", когда любое количество оптических фотонов обнаружено пиксельными ячейками в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора. Кроме того, этот выход может быть предназначен находиться в логическом состоянии "истина", когда это количество равно, превышает, не превышает заданное значение или находится в пределах заданного диапазона. Таким образом, метка времени может быть выдана посредством TDC 44 в зависимости от того, является ли частота срабатывания пиксельной ячейки, определяемая третичным логическим блоком 63 срабатывания в сочетании с блоком 2 задержки, большей, меньшей, равной заданной частоте или находится в пределах заданного диапазона от заданной частоты. Второй блок 61 задержки на фиг. 5 действует таким же образом, как и блок 56 задержки на фиг. 4. Пиксельные ячейки в строках 42, 43, 65, 66 пиксельных ячеек могут быть сброшены после выхода 57 первичного логического блока 54 срабатывания или после выхода 64 из логического элемента 62 И, чтобы подготовить пиксели в пиксельной матрице 41 оптического детектора к формированию следующей метки времени. Дополнительный логический элемент 62 И также включен в вариант осуществления на фигуре 5. Хотя дополнительные строки 65, 66 пиксельных ячеек и их соответствующие выходы также проиллюстрированы на фиг. 5, чтобы проиллюстрировать возможность масштабирования схемы до большего числа пикселей оптического детектора, следует понимать, что схема может быть приспособлена работать с одной или более такими строками пиксельных ячеек, причем каждая строка включает в себя одну или более пиксельных ячеек.

Вариант осуществления на фиг. 5 может быть предназначен использовать преимущество того наблюдения, что сцинтилляционный световой импульс, сгенерированный в элементе 40 сцинтиллятора после приема гамма-фотона, обычно характеризуется быстрой начальной частотой обнаружения оптических фотонов, вслед за чем происходит снижение частоты обнаружения оптических фотонов. Такой профиль типичен для сцинтилляционного светового импульса от гамма-фотона в системе формирования изображений ПЭТ, в которой быстрое начальное увеличение сцинтилляционного света сопровождается экспоненциальным затуханием. Постоянная высвечивания может составлять порядка 40 нс. В отличие от этого, профиль от шума темновых счетных импульсов, который генерируется беспорядочно, приводит к более равномерной частоте срабатывания пиксельной ячейки. Оптические фотоны, например, от излучения Черенкова могут быть непосредственно обнаружены таким же образом, как описано выше, хотя и в отсутствие элемента 40 сцинтиллятора. Эти характерные различия в частоте срабатывания пиксельной ячейки можно использовать во втором варианте осуществления, проиллюстрированном на фиг. 5, сделав пороговую частоту срабатывания пиксельной ячейки, требуемую для установки выхода 70 вторичного логического блока 55 срабатывания, зависимой от превышения конкретной частоты, и пороговую частоту срабатывания пиксельной ячейки, требуемую для установки выхода 69 третичного логического блока 63 срабатывания, зависимой от превышения

конкретной частоты, не превышения конкретной частоты или нахождения в пределах узкого диапазона. В последнем примере это может быть достигнуто с помощью системы, проиллюстрированной на фиг. 5, посредством такой организации, при которой количество выходов 42, 43, 65, 66 срабатывания строки, требуемое для того, чтобы  
5 заставить выход 69 третичного логического блока 63 срабатывания находиться в логическом состоянии "истина", находится в пределах узкого диапазона с центром около числа, которое меньше, чем требуемое для того, чтобы заставить выход 70 вторичного логического блока 55 срабатывания находиться в логическом состоянии "истина". Таким образом, формирование метки времени может быть сделано зависящим  
10 от превышения начальной частоты срабатывания пиксельной ячейки и нахождения последующей частоты срабатывания пиксельной ячейки в пределах более низкого и заданного диапазона. Регулируя пороговое условие частоты срабатывания, установленное вторичным логическим блоком 55 срабатывания и третичным логическим блоком 63 срабатывания, формирование метки времени можно сделать зависящим от  
15 любого желаемого профиля частоты срабатывания пиксельной ячейки, а значит, и от частоты генерации оптических фотонов, определенной в двух моментах времени.

В одной примерной реализации варианта осуществления, показанного на фиг. 5, каждая из моностабильных схем в блоке 51 укорачивания импульса имеет период 0,5 нс, блок 56 задержки имеет период задержки 1 нс, и блок 61 задержки имеет период  
20 задержки 10 нс. Кроме того, выход 57 первичного логического блока 54 срабатывания предназначен находиться в логическом состоянии "истина", когда любой из его входов от блока 51 укорачивания импульса находится в логическом состоянии "истина". Выход 59 вторичного логического блока 55 срабатывания предназначен находиться в логическом состоянии «истина», когда количество сработавших ячеек в пиксельной  
25 матрице 41 оптического детектора в течение 1-наносекундного периода задержки блока 56 задержки, а значит, и частота срабатывания пиксельной ячейки, соответствуют частоте приема гамма-фотонов, превышающей  $10^6$  отсчетов в секунду. Выход 69 третичного логического блока 63 срабатывания предназначен находиться в логическом состоянии «истина», когда количество сработавших ячеек в пиксельной матрице 41  
30 оптического детектора в течение 10-наносекундного периода блока задержки 61, а значит, и частота срабатывания пиксельной ячейки, соответствуют частоте приема гамма-фотонов, превышающей  $10^5$  отсчетов в секунду. Блок 1 укорачивания импульса принимает сигналы от выходов 48, 49, 67, 68 срабатывания строки, которые  
35 соответствуют всем строкам 42, 43, 65, 66 пиксельных ячеек в пиксельной матрице 41 оптического детектора. Таким образом, когда любая из пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора установлена в логическое состояние "истина", выход первичного логического блока 54 срабатывания устанавливается в логическое состояние "истина" на период 0,5 нс. Это соответствует срабатыванию  
40 выхода 57 первичного логического блока 54 срабатывания под действием первого оптического фотона. Блок 56 задержки задерживает распространение этого импульса к логическому элементу 50 И на период задержки 1 нс. Между тем, вторичный логический блок 55 срабатывания определяет, удовлетворяют ли выходы 48, 49, 67, 68 срабатывания строки на его входе его заданному условию частоты, соответствующему  
45 частоте приема гамма-фотонов, превышающей  $10^6$  отсчетов в секунду. Если это условие соблюдается в течение 1-наносекундного периода задержки блока 56 задержки, то его выход 70 устанавливается в логическое состояние "истина", что в конце 1-наносекундного периода задержки блока 56 задержки вызывает вывод "логической

истины" из логического элемента 50 И. Блок 61 задержки задерживает распространение этого импульса к логическому элементу 62 И на период задержки 10 нс. Между тем, третичный логический блок 63 срабатывания определяет, удовлетворяют ли в течение этого второго 10-наносекундного периода задержки выходы 48, 49, 67, 68 срабатывания строки на его входе его заданному условию частоты, соответствующему частоте приема 5 гамма-фотонов, превышающей  $10^5$  отсчетов в секунду. Если это условие соблюдается в течение 10-наносекундного периода блока 61 задержки, то его выход 69 устанавливается в логическое состояние "истина", что в конце 10-наносекундного периода блока 61 задержки вызывает вывод "логической истины" в соединение 64 срабатывания TDC, причем выход из логического элемента 62 И тем самым заставляет TDC 44 сформировать метку времени. Таким образом, формирование метки времени зависит от соблюдения первого и второго условий частоты срабатывания пиксельной ячейки по очереди; а значит, существует еще более высокий уровень уверенности в том, что срабатывание пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического 10 детектора произошло от сцинтилляционного светового импульса. Ясно, что могут использоваться другие конфигурации первичного, вторичного и третичного логических блоков 54, 55 и 63 срабатывания, альтернативные логические варианты осуществления логических элементов 50 и 62 И и альтернативные задержки в блоках 56 и 61 задержки, чтобы установить первое и второе условия частоты срабатывания пиксельной ячейки 20 равными любой желаемой частоте. Пиксельные ячейки в пиксельной матрице оптического детектора могут быть сброшены после того, как любой из выходов 57, 70 или 69 или 64 устанавливается в логическое состояние "истина", чтобы подготовить пиксельные ячейки к формированию следующей метки времени. Сделав описанную логическую схему программируемой, конфигурация может быть дополнительно 25 реконфигурирована, например, между использованиями или во время использования схемы при выполнении сканирования в ходе получения ПЭТ-изображения. При этом система может быть реконфигурирована, чтобы отрегулировать чувствительность и подавление шума во время использования.

Как описано со ссылкой на первый вариант осуществления, необязательный блок 30 47 интегратора, проиллюстрированный на фиг. 5, может дополнительно интегрировать сцинтилляционные световые импульсы от принятого гамма-фотона. Как описано в первом варианте осуществления, необязательный логический блок 46 подтверждения может обеспечить дополнительное различение шума посредством управления выдачей метки времени блоку 33 управления от TDC 44, или же его подавление, на основе общего 35 количества сработавших пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора. Необязательный блок 33 управления дополнительно может координировать различные описанные процессы.

В соответствии с третьим вариантом осуществления проиллюстрированный на фиг. 4 первый вариант осуществления дополнительно снабжен вторым преобразователем 40 TDC, аналогичным в работе преобразователю TDC 44 и упоминаемым в дальнейшем как опорный преобразователь "время-цифровой код" (RTDC). RTDC выполнен с возможностью принимать электрические сигналы от выхода 57 первичного логического блока 54 срабатывания и формировать вторую метку времени, когда этот выход делает переход из логического состояния "ложь" в логическое состояние "истина". Таким 45 образом, метка времени формируется не только тогда, когда соблюдается условие частоты срабатывания для вторичного логического блока срабатывания, но и формируется вторая метка времени, когда соблюдается условие для первичного логического блока 54 срабатывания. Вторая метка времени, относящаяся к условию

для первичного логического блока 54 срабатывания, указывает на время обнаружения конкретного количества оптических фотонов, а не указывает на конкретное условие частоты обнаружения оптических фотонов. Метка времени, сформированная посредством RTDC, может использоваться, чтобы предоставить информацию, относящуюся к форме сцинтилляционного светового импульса, который инициировал первичный логический блок 54 срабатывания. Эта информация о форме импульса может впоследствии использоваться для выполнения корректировки на уход показаний моментов времени или для оценки глубины взаимодействия гамма-фотона в элементе 40 сцинтиллятора, чтобы тем самым улучшить пространственное разрешение обнаружения первоначального гамма-фотона. Эта глубина взаимодействия может впоследствии использоваться в системе формирования изображений ПЭТ, чтобы дополнительно улучшить пространственное разрешение определения совпадающих пар гамма-фотонов, поскольку она дает возможность различения на основе угла падения гамма-фотона. Эта информация может сравниваться для двух очевидно совпадающих гамма-фотонов, чтобы отклонить гамма-фотоны, которые кажутся совпадающими, но которые вследствие их углов падения фактически являются предметом ошибки параллакса. Хотя вторая метка времени, произведенная посредством RTDC, подвержена более высокому риску ложного срабатывания, чем произведенная посредством TDC 44, и поэтому пропускает больше действительных гамма-фотонов, чем TDC 44, при формировании в сочетании с меткой времени от TDC 44 объединенные данные могут использоваться таким образом, чтобы улучшить пространственное разрешение системы формирования изображений. Как описано выше, логические блоки 54 и 55 срабатывания могут быть сделаны программируемыми, чтобы был возможен отсчет характеристик сцинтилляционного светового импульса по нескольким моментам времени. Схема, описанная в этом третьем варианте осуществления, также может быть адаптирована посредством включения дополнительных логических блоков срабатывания, каждый с соответствующим преобразователем "время-цифровой код", чтобы либо формировать дополнительные метки времени в разные времена на всем протяжении сцинтилляционного светового импульса, либо в качестве предварительного условия для TDC 44, формирующего метку времени. Дополнительные метки времени могут использоваться для того, чтобы улучшить определение формы сцинтилляционного светового импульса и тем самым обеспечить еще более точную корректировку на уход показаний моментов времени, уменьшение дрожания синхронизации или улучшение оценки глубины взаимодействия. При использовании в качестве предварительного условия для TDC 44 при формировании метки времени полученная в результате метка времени обладает преимуществом генерирования с еще более высокой вероятностью электрических сигналов от пиксельных ячеек, происходящих из-за гамма-фотона.

В примерной реализации третьего варианта осуществления система на фиг. 4 выполнена таким образом, что первый обнаруженный оптический фотон заставляет выход 57 первичного логического блока 54 срабатывания находиться в логическом состоянии "истина", и таким образом, что вторичный логический блок 55 срабатывания заставляет логический элемент 50 И вынуждать TDC 44 формировать метку времени, когда частота срабатывания пиксельной ячейки для пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора превышает ожидаемую начальную частоту от гамма-фотона. Эта частота, например, может составлять 50 оптических фотонов/нс. Блок 56 задержки может быть выполнен имеющим период задержки, например, 1 нс. Поэтому преобразователь RTDC, принимающий электрические сигналы от выхода 57 первичного логического блока 54 срабатывания, выполнен с возможностью

формировать метку времени, когда обнаружен первый оптический фотон. Когда синхронизация является точной, разность во времени между меткой времени RTDC и меткой времени TDC, как ожидается, будет равна времени блока 56 задержки, добавленному к времени нарастания сцинтилляционного светового импульса, то есть  
5 приблизительно 1 нс. Однако, если дело обстоит не так, то может быть выполнена корректировка на уход показаний моментов времени посредством умножения такта TDC на масштабный коэффициент, чтобы дело обстояло именно так. Кроме того, может быть выполнено вычисление глубины взаимодействия кванта излучения в элементе сцинтиллятора, чтобы улучшить пространственное разрешение системы формирования  
10 изображений ПЭТ. Вычисление глубины взаимодействия может быть выполнено блоком вычисления глубины взаимодействия, выполненным с возможностью вычислять глубину взаимодействия с использованием справочной таблицы или статистической функции, устанавливающей соотношение разностей во времени и глубины взаимодействия в элементе сцинтиллятора. Такая справочная таблица или статистическая функция могут  
15 быть созданы из эвристической или модельной информации о разности во времени на основе геометрии элемента сцинтиллятора.

В соответствии с четвертым вариантом осуществления проиллюстрированный на фиг. 5 второй вариант осуществления дополнительно оснащен вторым преобразователем TDC, упоминаемым в дальнейшем как опорный преобразователь "время-цифровой  
20 код" (RTDC), и третьим преобразователем TDC; оба дополнительных TDC аналогичны по работе преобразователю TDC 44. Второй TDC или RTDC выполнен с возможностью принимать электрические сигналы от выхода 57 первичного логического блока 54 срабатывания и формировать вторую метку времени, когда сигнал на этом выходе делает переход из логического состояния "ложь" в логическое состояние "истина".  
25 Третий TDC выполнен с возможностью принимать электрические сигналы от выхода 70 вторичного логического блока 55 срабатывания и формировать третью метку времени, когда этот выход делает переход из логического состояния "ложь" в логическое состояние "истина". Таким образом, после приема гамма-фотона формируются три метки времени. Первая метка времени формируется посредством TDC 44, когда  
30 соответственно соблюдены условия срабатывания для первичного, вторичного и третичного логических блоков 54, 55 и 63 срабатывания. На практике должна формироваться именно последняя из трех меток времени. Вторая метка времени формируется, когда соблюдено условие для первичного логического блока 54 срабатывания. Вторая метка времени указывает на обнаружение конкретного количества  
35 оптических фотонов. Третья метка времени относится к условию для вторичного логического блока 55 срабатывания и указывает на то, что была достигнута заданная частота срабатывания пиксельной ячейки для пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора. Дополнительные вторая и третья метки времени обеспечивают дополнительную информацию, относящуюся к форме сцинтилляционного  
40 светового импульса, который инициирует первичный логический блок 54 срабатывания. Как и при третьем варианте осуществления, эта информация о форме импульса может впоследствии использоваться, чтобы выполнить корректировку на уход показаний моментов времени или оценить глубину взаимодействия гамма-фотона в элементе 40 сцинтиллятора и тем самым улучшить пространственное разрешение обнаружения  
45 первоначального гамма-фотона. Сделав логические блоки срабатывания программируемыми, с этой конфигурацией становится возможным большое изменение точек отсчетов. Схема, описанная в этом четвертом варианте осуществления, также может быть расширена посредством добавления одного или более дополнительных

логических блоков срабатывания, каждый с соответствующим преобразователем "время-цифровой код" для того, чтобы формировать дополнительные метки времени в разные моменты времени на всем протяжении сцинтилляционного светового импульса. Такие метки времени могут аналогичным образом использоваться, чтобы улучшить  
5 определение формы сцинтилляционного светового импульса и тем самым обеспечить еще более точную корректировку на уход показаний моментов времени или улучшенную оценку глубины взаимодействия.

В примерной реализации четвертого варианта осуществления схема на фиг. 5 выполнена таким образом, что каждая из моностабильных схем в блоке 51 укорачивания  
10 импульса имеет период 0,5 нс, блок 56 задержки имеет период задержки 1 нс, и блок 61 задержки имеет период задержки 10 нс. Кроме того, выход 57 первичного логического блока 54 срабатывания предназначен находится в логическом состоянии "истина", когда любой из его входов от блока 51 укорачивания импульса находится в логическом состоянии "истина". Выход 70 вторичного логического блока 55 срабатывания  
15 предназначен находится в логическом состоянии "истина", когда количество пиксельных ячеек, сработавших в пиксельной матрице 41 оптического детектора в течение 1-наносекундного периода блока 56 задержки, соответствует частоте приема гамма-фотонов, превышающей  $10^6$  отсчетов в секунду. Выход 69 третичного логического  
20 блока 63 срабатывания предназначен находится в логическом состоянии "истина", когда количество сработавших ячеек в пиксельной матрице 41 оптического детектора в течение 10-наносекундного периода блока 61 задержки соответствует частоте приема гамма-фотонов, превышающей  $10^5$  отсчетов в секунду. Блок 1 укорачивания импульса принимает сигналы от выходов 48, 49, 67, 68 срабатывания строки, которые  
25 соответствуют всем строкам 42, 43, 65, 66 пиксельных ячеек в пиксельной матрице 41 оптического детектора. Таким образом, когда любая из пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора устанавливается в логическом состоянии "истина", выход первичного логического блока 54 срабатывания устанавливается в логическое состояние "истина" на период 0,5 нс. Это соответствует срабатыванию  
30 выхода 57 первичного логического блока 54 срабатывания под действием первого обнаруженного оптического фотона. Таким образом, опорный TDC (не показан), соединенный с выходом 57, формирует метку времени, когда соблюдается это условие. Выход вторичного логического блока 55 срабатывания предназначен находится в логическом состоянии "истина", когда частота срабатывания пиксельной ячейки для  
35 пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы 41 оптического детектора соответствует частоте приема гамма-фотонов, превышающей  $10^6$  отсчетов в секунду. Таким образом, третий TDC (не показан) формирует метку времени, когда соблюдается это условие. Наконец, при соблюдении условия для третичного логического блока 63 срабатывания, т.е. частота приема гамма-фотонов превышает  $10^5$  отсчетов в секунду,  
40 TDC 44 формирует метку времени. Таким образом, прием гамма-фотона приводит к формированию трех меток времени по очереди, которые могут использоваться, чтобы улучшить определение формы сцинтилляционного светового импульса и тем самым обеспечить еще более точную корректировку на уход показаний моментов времени или улучшенную оценку глубины взаимодействия.

45 Подводя итог, блок синхронизации и блок срабатывания метки времени для формирования временных меток обнаруженных квантов излучения с улучшенным подавлением шума были описаны с конкретной ссылкой на систему формирования изображений ПЭТ. Изобретение имеет дополнительное применение при детектировании



квантов излучения в областях применения физики частиц с высокой энергией, а также при прямом обнаружении квантов излучения в форме оптических фотонов, таких как излучение Черенкова. Улучшенное подавление шума достигнуто посредством совместной работы, при которой блок срабатывания метки времени заставляет блок синхронизации формировать метку времени на основе частоты срабатывания пиксельной ячейки для пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы оптического детектора. Улучшенное временное разрешение достигнуто с помощью раскрытого изобретения, улучшенное подавление шума которого позволяет формировать метку времени после обнаружения меньшего количества оптических фотонов. Требования к охлаждению оптических детекторов также ослаблены вследствие улучшенного подавления шума и снижения частоты ложного срабатывания, что дает возможность их работы при температуре, более близкой к комнатной температуре.

Хотя изобретение было подробно проиллюстрировано и описано на чертежах и в предшествующем описании, такие иллюстрации и описание следует считать иллюстративными или примерными, а не ограничивающими; изобретение не ограничено раскрытыми вариантами осуществления и может использоваться для хронометрирования обнаружения квантов излучения в различных применениях в области физики частиц с высокой энергией.

#### (57) Формула изобретения

1. Устройство обнаружения излучения, содержащее:
  - пиксельную матрицу (3а) оптического детектора, имеющую одну или более пиксельных ячеек (9), которые могут срабатывать под действием оптических фотонов;
  - блок (71) срабатывания метки времени, находящийся в функциональной связи с по меньшей мере одним блоком (44) синхронизации;
  - причем блок (71) срабатывания метки времени выполнен с возможностью принимать сигналы от пиксельной матрицы (3а) оптического детектора и дополнительно выполнен с возможностью определять по меньшей мере первую частоту срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора;
  - причем упомянутая по меньшей мере первая частота срабатывания пиксельной ячейки определяется посредством вычисления количества сработавших пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора в течение заданного периода задержки;
  - причем блок (71) срабатывания метки времени выполнен с возможностью вынуждать упомянутый по меньшей мере один блок (44) синхронизации формировать первую метку времени, указывающую на конец заданного периода задержки, на основе упомянутой по меньшей мере первой частоты срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора.
2. Устройство обнаружения излучения по п. 1, при этом блок (71) срабатывания метки времени выполнен с возможностью вынуждать упомянутый по меньшей мере один блок (44) синхронизации формировать первую метку времени, если упомянутая по меньшей мере первая частота срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора превышает пороговое значение частоты.
3. Устройство обнаружения излучения по п. 1, при этом первая метка времени формируется дополнительно на основе подсчитанного количества сработавших

пиксельных ячеек для упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора;

причем первая метка времени формируется, если подсчитанное количество сработавших пиксельных ячеек удовлетворяет заданному условию подсчитанного количества сработавших пиксельных ячеек перед тем, как упомянутая по меньшей мере первая частота срабатывания пиксельной ячейки удовлетворяет заданному условию частоты срабатывания пиксельной ячейки.

4. Устройство обнаружения излучения по п. 3, при этом заданное условие подсчитанного количества сработавших пиксельных ячеек состоит в том, что подсчитанное количество сработавших пиксельных ячеек превышает пороговое значение счета;

и при этом заданное условие частоты срабатывания пиксельной ячейки состоит в том, что упомянутая по меньшей мере первая частота срабатывания пиксельной ячейки превышает пороговое значение частоты;

и при этом заданный период задержки начинается, когда подсчитанное количество сработавших пиксельных ячеек превышает пороговое значение счета;

так что упомянутый по меньшей мере один блок (44) синхронизации вынужден формировать первую метку времени, если подсчитанное количество сработавших пиксельных ячеек превышает пороговое значение счета и затем впоследствии превышает более высокое значение счета до конца заданного периода задержки таким образом, что превышено пороговое значение частоты.

5. Устройство обнаружения излучения по п. 3, дополнительно содержащее блок регулировки метки времени, выполненный с возможностью принимать первую метку времени от упомянутого по меньшей мере одного блока (44) синхронизации;

причем блок регулировки метки времени выполнен с возможностью формировать отрегулированную первую метку времени, указывающую на то время, в которое было соблюдено заданное условие подсчитанного количества сработавших пиксельных ячеек, посредством вычитания заданного периода задержки из времени первой метки времени.

6. Устройство обнаружения излучения по п. 1, при этом блок (71) срабатывания метки времени выполнен с возможностью вынуждать упомянутый по меньшей мере один блок (44) синхронизации формировать первую метку времени дополнительно на основе второй частоты срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора, и при этом вторая частота срабатывания пиксельной ячейки определяется в более поздний момент времени, чем первая частота срабатывания пиксельной ячейки.

7. Устройство обнаружения излучения по п. 6, при этом блок (71) срабатывания метки времени выполнен с возможностью вынуждать упомянутый по меньшей мере один блок (44) синхронизации формировать первую метку времени, если первая частота срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора превышает первую пороговую частоту и вторая частота срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора превышает вторую пороговую частоту.

8. Устройство обнаружения излучения по любому из пп. 1-4, дополнительно содержащее по меньшей мере второй блок синхронизации;

причем упомянутый по меньшей мере второй блок синхронизации связан с блоком (71) срабатывания метки времени;

причем блок (71) срабатывания метки времени дополнительно выполнен с возможностью вынуждать упомянутый по меньшей мере второй блок синхронизации формировать метку времени счета фотонов, указывающую на время обнаружения одного или более оптических фотонов пиксельными ячейками (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора.

9. Устройство обнаружения излучения по п. 1, дополнительно содержащее по меньшей мере второй блок синхронизации;

причем упомянутый по меньшей мере второй блок синхронизации связан с блоком (71) срабатывания метки времени;

причем блок (71) срабатывания метки времени дополнительно выполнен с возможностью вынуждать упомянутый по меньшей мере второй блок синхронизации формировать метку времени частоты срабатывания, указывающую на то время, в которое частота срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора удовлетворяет второму условию частоты срабатывания.

10. Система (20) формирования изображений ПЭТ, содержащая множество устройств обнаружения излучения по любому из пп. 1-9;

причем каждое устройство обнаружения излучения дополнительно содержит элемент (2а) сцинтиллятора, находящийся в оптической связи с пиксельной матрицей (3а)

оптического детектора.

11. Система (20) формирования изображений ПЭТ, содержащая множество устройств обнаружения излучения по любому из пп. 8-9;

причем каждое устройство обнаружения излучения дополнительно содержит элемент (2а) сцинтиллятора, находящийся в оптической связи с пиксельной матрицей (3а)

оптического детектора;

система (20) формирования изображений ПЭТ дополнительно содержит:

блок вычисления глубины взаимодействия;

причем блок вычисления глубины взаимодействия выполнен с возможностью вычислять глубину взаимодействия кванта излучения в элементе (2а) сцинтиллятора на основе либо i) разности во времени между первой меткой времени и меткой времени счета фотонов, либо ii) разности во времени между первой меткой времени и меткой времени частоты срабатывания.

12. Система (20) формирования изображений ПЭТ, содержащая множество устройств обнаружения излучения по любому из пп. 8-9;

причем каждое устройство обнаружения излучения дополнительно содержит элемент (2а) сцинтиллятора, находящийся в оптической связи с пиксельной матрицей (3а) оптического детектора;

система (20) формирования изображений ПЭТ дополнительно содержит блок корректировки метки времени, выполненный с возможностью формировать скорректированную метку времени на основе взвешенного среднего первой метки времени и второй метки времени.

13. Способ синхронизации для использования при формировании изображений ПЭТ или формировании изображений на основе излучения Черенкова, включающий этапы, на которых:

принимают сигналы от пиксельной матрицы (3а) оптического детектора, указывающие на срабатывание одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора;

определяют по меньшей мере первую частоту срабатывания пиксельной ячейки для

упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора посредством вычисления количества сработавших пиксельных ячеек в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора в течение заданного периода задержки;

5 формируют первую метку времени, которая указывает на конец заданного периода задержки и также указывает на обнаружение кванта излучения, на основе упомянутой по меньшей мере первой частоты срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора.

10 14. Носитель данных, содержащий компьютерный программный продукт, содержащий исполняемые компьютером команды, которые будучи исполняемыми компьютером, позволяют упомянутому компьютеру выполнять этапы способа, на которых:

15 принимают сигналы от пиксельной матрицы (3а) оптического детектора, указывающие на срабатывание одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора;

определяют по меньшей мере первую частоту срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора посредством вычисления количества сработавших пиксельных  
20 ячеек в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора в течение заданного периода задержки;

формируют первую метку времени, которая указывает на конец заданного периода задержки и также указывает на обнаружение кванта излучения, на основе упомянутой по меньшей мере первой частоты срабатывания пиксельной ячейки для упомянутых  
25 одной или более пиксельных ячеек (9) в пределах пиксельной матрицы (3а) оптического детектора.

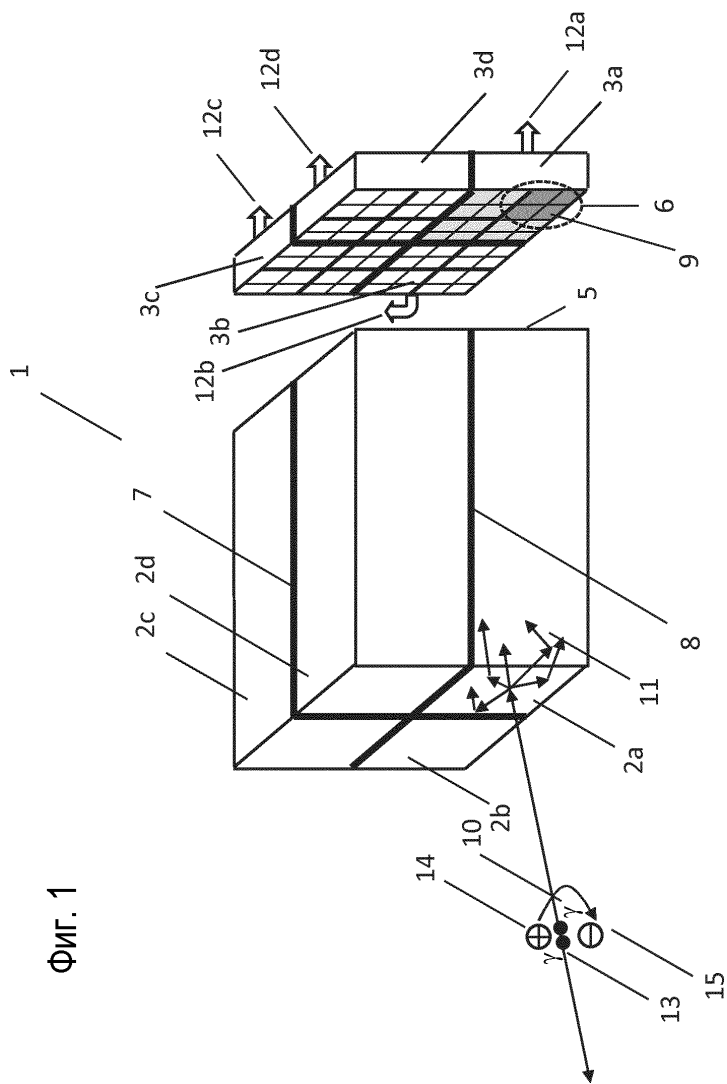
15. Носитель данных, содержащий компьютерный программный продукт по п. 14, причем исполняемые компьютером команды дополнительно предназначены для выполнения этапа способа, на котором

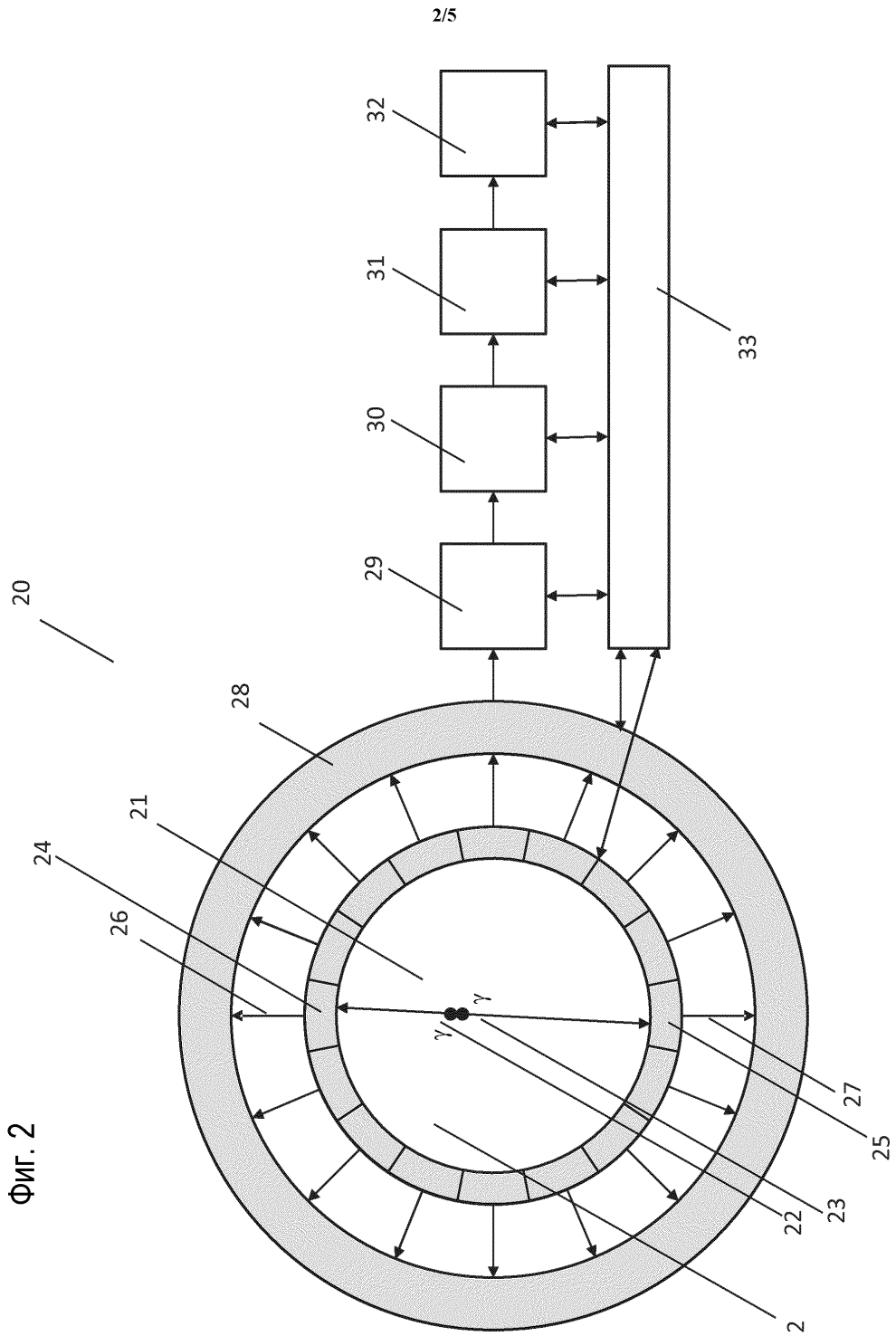
30 формируют отрегулированную первую метку времени посредством вычитания заданного периода задержки из времени первой метки времени.

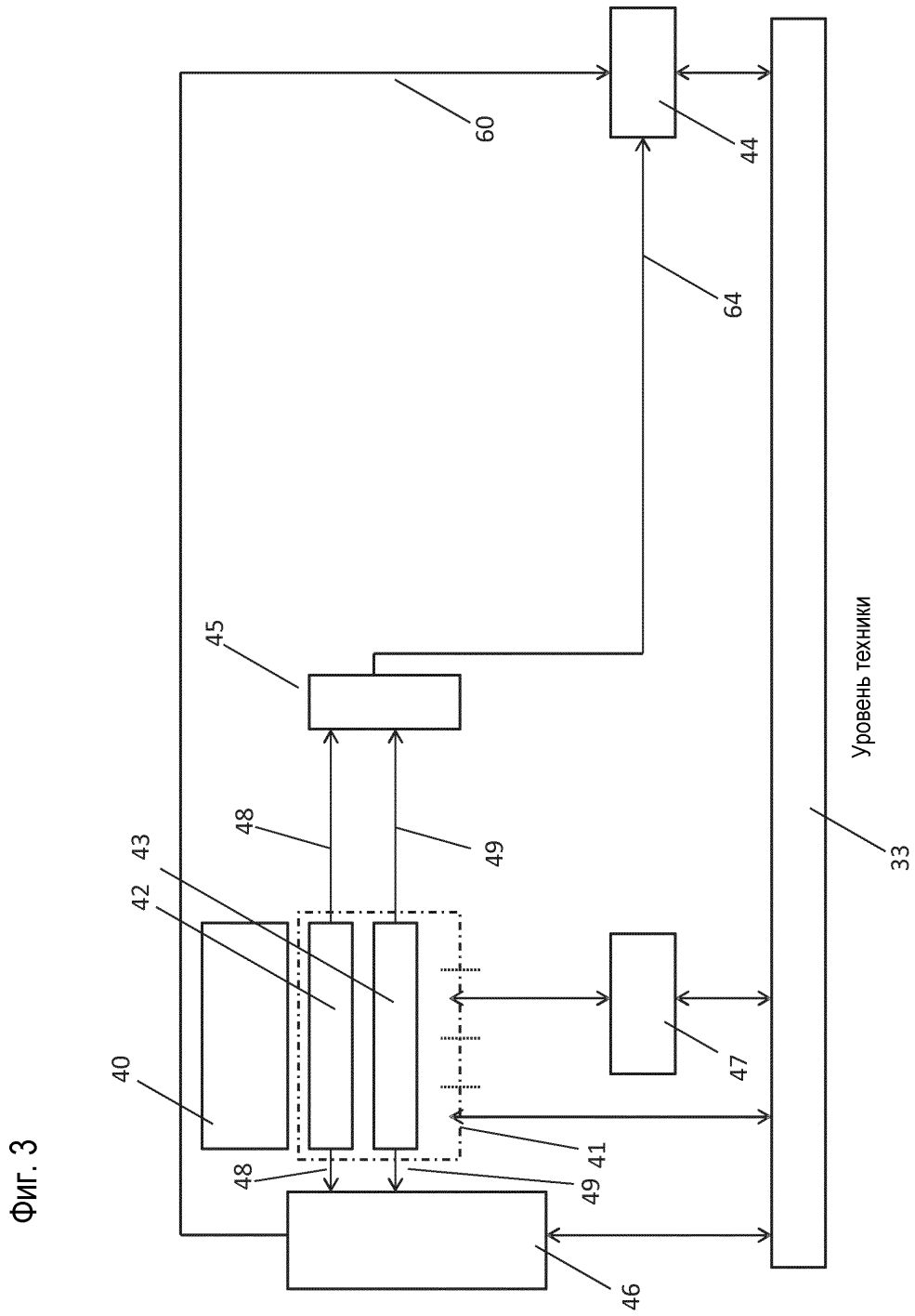
35

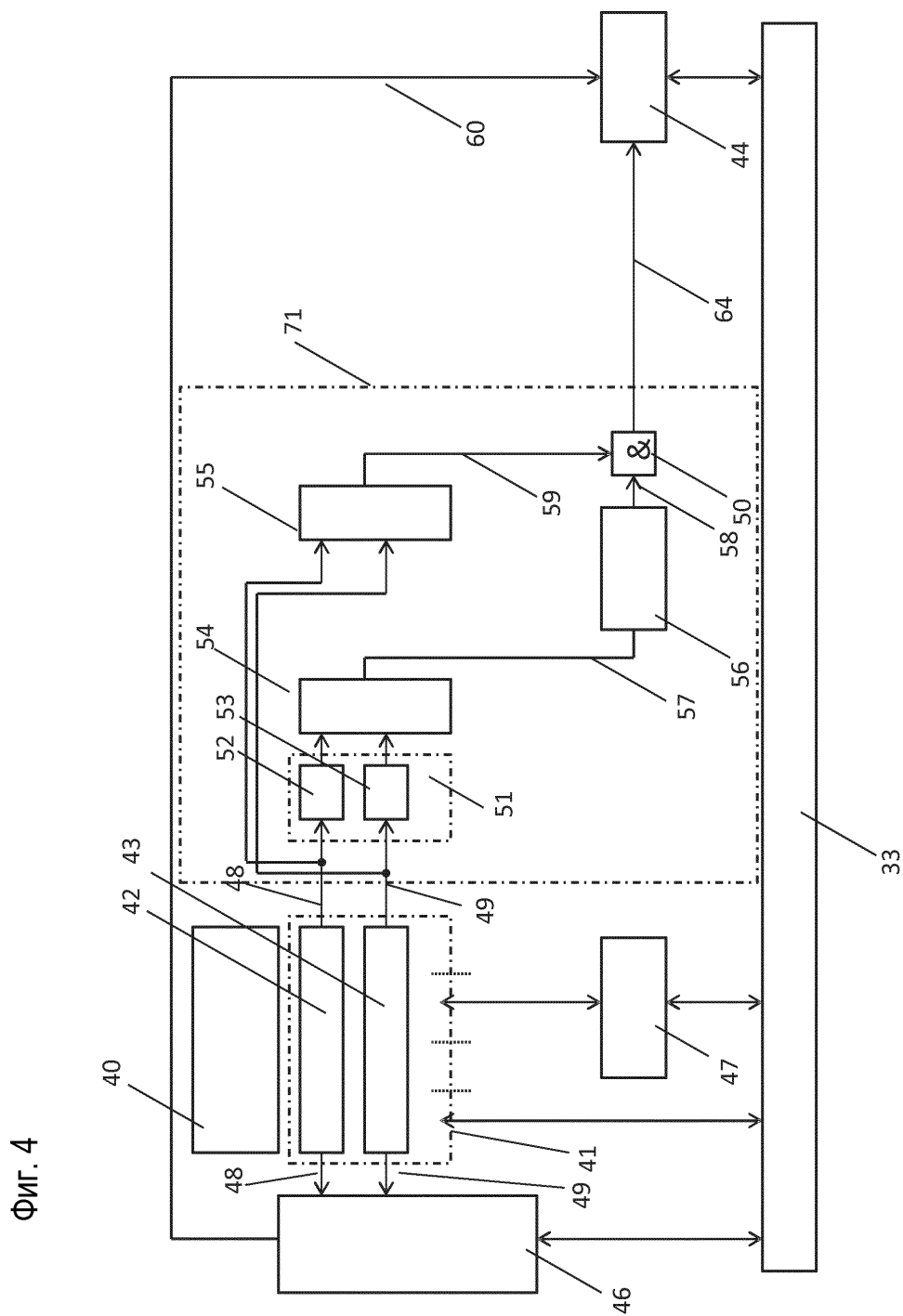
40

45











ФИГ. 5

