ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 24–30

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 681.5+004.75

СПОСОБ ИНТЕГРАЛЬНОГО СЧЕТА ЧАСТИЦ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПУЧКА ОДНОРОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2025 г. Д. Д. Богаченко[a,*], В. И. Силаев[a]

[a] Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова национального исследовательского центра "Курчатовский институт"
Россия, 117218, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

** e-mail: mypochta-78@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2024 г.
После доработки 17.02.2025 г.
Принята к публикации 31.03.2025 г.

Рассмотрен способ интегрального счета числа частиц в поперечном сечении пучка однородного излучения, основанный на измерении числа треков частиц, зарегистрированных в плоскости твердотельного детектора с использованием технологии машинного зрения.

DOI: 10.31857/S0032816225030045

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка интегрального счета частиц по технологии машинного зрения [1] проводилась в ИТЭФ на автоматизированном измерительном координатном микроскопе установки МАС-1, подробно описанной в работе [2].

Согласно технологиям машинного зрения, обрабатываются не сами измеряемые объекты (в частности, треки на зарегистрировавшем их твердотельном детекторе), а их оптические изображения (рис. 1), проецируемые оптическим объективом микроскопа на плоскость ПЗС-матрицы [3], являющейся оптико-электронным преобразователем, изготовленным на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС). ПЗС-матрица представляет собой двумерный массив светочувствительных полупроводниковых ячеек (пикселей) размером от 5 до 400 мкм, отделенный слоем диэлектрика от подложки из поликристаллического кремния. К ячейкам с помощью электродов приложено напряжение от внешнего источника, формирующее электрическое поле ПЗС-матрицы (рис. 2).

В диагностике пучков частиц ПЗС-матрица как светочувствительный элемент телевизионной ПЗС-камеры используется для получения двумерного изображения распределения плотности пучка излучения в его поперечном сечении [3].

В настоящее время технологии машинного зрения используются более широко, в частности, для обработки изображений треков частиц,

Рис. 1. Фрагмент координатной сетки, нанесенной на плоскость облученного слюдяного детектора, предназначенной для поштучного визуального подсчета следов частиц в поле зрения оптического микроскопа.

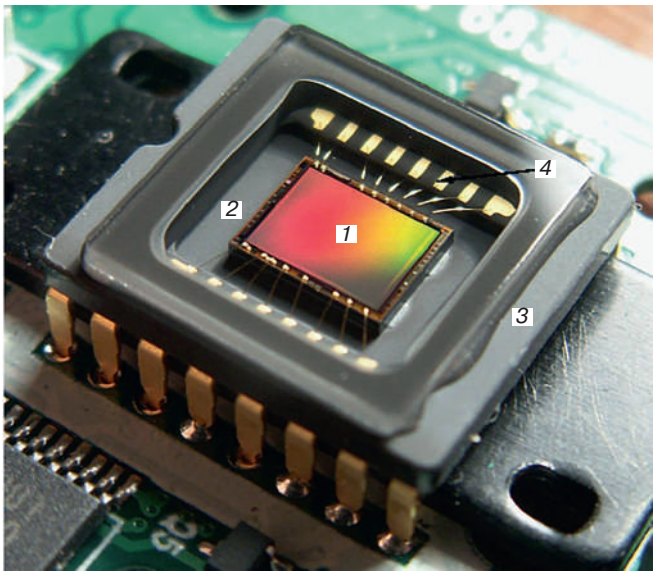

Рис. 2. Структура ПЗС-матрицы: *1* – двумерный массив светочувствительных полупроводниковых ячеек, *2* – слой диэлектрика, *3* – подложка из поликристаллического кремния, *4* – электроды.

зарегистрированных в твердотельных детекторах в экспериментах в области физики элементарных частиц [4, 5]. Автоматические и полуавтоматические измерительные установки содержат при этом функционально схожие основные узлы, такие как оптико-электронная система, укомплектованная телевизионной камерой со светочувствительным элементом из ПЗС-матрицы, компьютером с контроллером, предназначенным для оцифровки изображений с ПЗС-матрицы телевизионной камеры [4–6] и вывода оцифрованных изображений в ЭВМ.

Наличие таких узлов на автоматических или полуавтоматических установках позволяет с высокой скоростью решать задачи получения количественных и качественных результатов измерений путем поштучного поиска и обмера больших массивов треков частиц в неоднородных пучках [5, 6].

Для измерений, связанных с определением количества частиц в поперечном сечении пучка однородного излучения, зарегистрированных в плоскости твердотельного детектора, предлагается интегральный способ счета частиц, в основе реализации которого лежит использование технологии машинного зрения.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Изображения треков частиц в кадре ПЗС-камеры могут быть двух различных видов: сером, базовом, изображении, пиксели ПЗС-матрицы которого имеют различные уровни почернения в интервале от 0 до 255 единиц, соответствующем 256 уровням почернений, заложенным в контроллере, и пороговом изображении, в котором пиксели изображения кадра имеют один из двух уровней почернения с численным значением равным либо нулю, либо численному значению уровня, называемому порогом, значение которого определяется специальной процедурой, описанной ниже.

Виды оцифровки изображения закладываются в контроллер разработчиком ООО “ВИДЕОСКАН” и определяются одним из типов прошивки, которые поставляются пользователю вместе с описанием контроллера.

Оцифровываемый в контроллере сигнал, как в сером (рис. 3), так и в пороговом (рис. 4) изображениях, передается параллельно на видеопросмотровое устройство (монитор), а его оцифрованные данные заносятся в память компьютера.

Изображение части плоскости детектора, проектируемое оптическим объективом микроскопа на светочувствительную поверхность ПЗС-матрицы, занимает прямоугольную область [$\Delta X \times \Delta Y$], содержащую фиксированное количество пикселей, например 512×512 или 1024×1024 шт. и др., образующих область кадра ПЗС-камеры. При сканировании плоскости детектора рамки кадра перемещаются по осям X и Y прямоугольной системы координат микроскопа на расстояния ΔX или ΔY, равные размерам рамки кадра, с точностью до ± 1 мкм, обеспечиваемой безынерционными приводами и отсчетными устройствами линейных перемещений кареток X и Y полуавтоматического микроскопа МАС-1, разработанного в ИТЭФ [2]. При этом не требуется никаких дополнительных разметок ни на детекторе, ни на его изображении, так как расстояния, пройденные рамками кадра относительно плоскости детектора, при каждом перемещении на один очередной кадр отсчитываются ЭВМ и выводятся с точностью ± 1 мкм на экран отдельного монитора для контроля оператором.

Интегральный способ счета количества следов частиц в кадре ПЗС-камеры осуществляется в пороговом исполнении изображений следов частиц, который проводится в ИТЭФ на автоматизированном измерительном микроскопе установки МАС-1 (ИТЭФ), оснащенной телевизионной ПЗС-камерой SONY CCB-M27B/CE производства ООО “ВИДЕОСКАН”

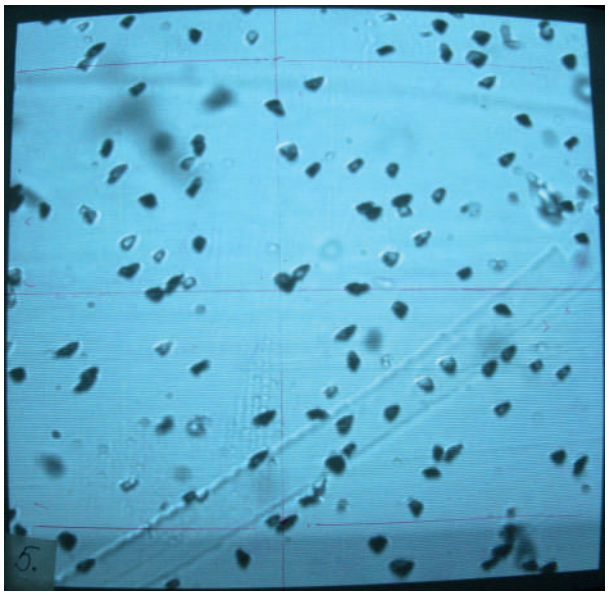

Рис. 3. Кадр на видеомониторе в сером изображении треков частиц с ненулевым значением фона.

Рис. 4. Тот же кадр на видеомониторе, что и на рис. 3, но его средняя часть показана уже в пороговом черно-белом изображении треков частиц с нулевым значением фона.

со светочувствительным элементом ПЗС-матрицы с количеством пикселей 512 × 512 (рис. 2), компьютером типа IBM PC/AT с видеоплатой и контроллером типа VS54/2.

3. ПОРОГОВОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Для интегрального счета количества треков частиц в поперечном сечении пучка однородного излучения, зарегистрированных в плоскости твердотельного детектора, избирается технология машинного зрения, в соответствии с которой проводимые для этого измерения осуществляются не в плоскости детектора, а в плоскости его изображения, проецируемого оптической системой микроскопа на плоскость ПЗС-матрицы пикселей телевизионной ПЗС-камеры. Аналоговый сигнал серого изображения кадра ПЗС-камеры поступает для визуального контроля на видеопросмотровое устройство оператора и параллельно на контроллер в компьютере для оцифровки уровней почернений пикселей в кадре ПЗС-камеры и переходу к пороговому изображению по следующему алгоритму.

Для перехода от серого заложенного в ПЗС-камеру изображения частиц в кадре ПЗС-камеры к их пороговому изображению определяется уровень почернения порога. С этой целью в некоторой области измерения серое изображение треков частиц в кадре размывается до состояния, сливающегося с вновь образующимся фоном, заполняющим полностью кадр ПЗС-камеры, и передается напрямую в ЭВМ, где уровень почернения размытого изображения кадра оцифровывается в контроллере целым числом из интервала от 0 до 255 единиц, что принимается за численное значение порога, обозначается символом P и заносится в файл. Далее это размытое изображение треков частиц в кадре восстанавливается, и на него накладывается порог.

При наложении порога на восстановленное серое изображение кадра ПЗС-камеры (рис. 3), уровни почернения пикселей кадра ПЗС-матрицы, которые оказались меньше значения уровня почернения порога, оцифровываются численным значением равным нулю. Уровни почернения пикселей ПЗС-матрицы, которые оказались равными или большими значения уровня почернения порога P, оцифровываются числом P. Полученное изображение черных треков частиц на очищенном от помех однородном светлом фоне называется пороговым изображением (рис. 4), а описанную процедуру называют фильтрацией изображения кадра ПЗС-камеры.

В пороговом изображении треков частиц измеряемая величина (количество M черного в кадре ПЗС-камеры) оцифровывается суммой численных значений P, определяемой числом пикселей, изображающих полное количество треков в кадре ПЗС-камеры, и выражается формулой

$$M = Pn, \qquad (1)$$

где M – численное значение количества черного в кадре; P – уровень почернения каждого пикселя, численно равный уровню почернения порога; n – число пикселей в пороговом изображении треков частиц в кадре ПЗС-камеры.

Из выражения (1) следует, что пороговое изображение позволяет установить взаимно однозначное соответствие между количеством черного в кадре и числом пикселей, образующих изображения треков в кадре.

Переходя от измерений в единицах M к измерениям в единицах n, при смене кадров можно записать:

$$n = M/P. \quad (2)$$

Здесь M – величина переменная, P – величина неизменная, численно равная значению порога.

Рассмотрим ситуацию, когда изображение каждого трека частицы в плоскости кадра ПЗС-камеры содержит одно и то же число пикселей, образующих изображения треков в кадре. На практике подобная ситуация будет иметь место в тех случаях, когда траектории частиц пучка однородного излучения будут пересекать плоскость регистрации твердотельного детектора под одним и тем же углом.

В этом случае число изображений треков в кадре ПЗС-камеры может быть выражено следующей формулой:

$$K = n/\varepsilon, \quad (3)$$

где n – число пикселей, образующих количество изображений треков частиц в кадре, определяемое равенством (2), ε – число пикселей в изображении одного трека частицы в кадре ПЗС-камеры – величина одна и та же для каждого трека (численно неизвестная), K – число изображений треков частиц в кадре ПЗС-камеры.

Задача сводится к определению численного значения ε, единого для изображения каждого следа частицы облучения в каждом кадре ПЗС-камеры.

Преобразовав выражение (3) к виду

$$\varepsilon = n/K, \quad (4)$$

получим выражение, отражающее обратно пропорциональную зависимость величины ε от количества K треков в кадре ПЗС-камеры, которое может быть установлено независимым прямым визуально-ручным счетом.

Определение единого численного значения ε проиллюстрируем нашими измерениями на установке МАС-1 (ИТЭФ).

Для нахождения единого численного значения величины ε выделялась короткая серия кадров изображений ПЗС-камеры, разбросанных в нескольких (в нашем случае в семи) различных точках (x_i, y_i), $i = 1, 2, \ldots 7$ области измерений, где i – порядковый номер кадра в короткой серии кадров.

В каждом кадре короткой серии кадров, проектируемом на экран монитора, визуально-ручным способом метится каждый след частицы и проводится поштучный подсчет числа k_i следов частиц в кадре. По значениям $n_i = M_i/P$ и k_i для каждого из семи кадров расчетным путем определялась величина

$$\varepsilon_i = n_i/k_i,$$

где ε_i – число пикселей в изображении одного трека в i-м кадре короткой серии кадров.

Оцифрованные значения M_i, k_i, n_i, ε_i которые отражены в табл. 1, записывались в виде файла на компьютер.

Для определения единого численного значения ε_0, с помощью которого будет рассчитываться число K следов частиц в каждом кадре, при сканировании плоскости детектора для каждого из семи кадров было рассчитано число следов с каждым из семи значений ε_i,что отражено в табл. 1.

Среди семи расчетных значений ε_i были отобраны четыре, при которых расчетные значения K_i и одноименные с ними значения k_i поштучного счета удовлетворяли условию $|K_i - k_i| \leqslant 0.5$ для наибольшего количества номеров i. Таковыми оказались значения ε_1, ε_2, ε_5 и ε_7 в кадрах с соответствующими номерами. Было рассчитано среднее значение $\bar{\varepsilon}$ по формуле

$$\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_5 + \varepsilon_7)/4 = 1.535.$$

Полученное значение было использовано для определения числа K_i следов частиц в каждом кадре короткой серии в соответствии с выражением

$$K_i = n_i/\bar{\varepsilon}.$$

Полученные значения отражены в табл. 2.

Видно, что в четырех кадрах из семи расчетные значения K_i, округленные до целых чисел, совпадают со значениями k_i в тех же кадрах при поштучном счете. Несовпадение K на один след с количеством следов k при поштучном счете в каждом из оставшихся трех кадрах составляет ошибку, не превышающую 1.5% (см. табл. 2).

На основании полученных результатов численное значение $\bar{\varepsilon} = 1.535$ принимается за единое

Таблица 1. Результаты измерений оцифрованных значений M_i, k_i, n_i, ε_i на установке МАС-1 (ИТЭФ) при $P = 100$, $\varepsilon_0 = 1.535$

i	1	2	3	4	5	6	7
M_i	15461	13962	14585	12548	14274	11718	9252
n_i	154.61	139.62	145.85	125.48	142.74	117.18	92.52
k_i	101	91	94	83	93	75	60
ε_i	1.5301	1.5343	1.5515	1.5118	1.5348	1.5685	1.542
$K_i(\varepsilon_1)$	101	91.2	95.28	81.97	93.27	76.85	60.44
$K_i(\varepsilon_2)$	100.77	91	95.06	81.78	93.03	76.67	60.3
$K_i(\varepsilon_3)$	99.6	89.98	94.00	80.87	91.99	75.80	59.63
$K_i(\varepsilon_4)$	102.27	92.35	96.47	83.00	94.42	77.81	61.20
$K_i(\varepsilon_5)$	100.73	90.97	95.03	81.76	93.00	76.69	60.28
$K_i(\varepsilon_6)$	98.68	89.01	93.62	80.00	91.00	75.00	58.99
$K_i(\varepsilon_7)$	100.27	90.54	94.58	81.37	92.57	76.29	60
$n_i/\bar{\varepsilon}$	100.46	90.72	94.77	81.5	92.75	76.44	60.11

Таблица 2. Определение числа следов в кадре со средним значением ε_0 независимо от номера кадра

i	1	2	3	4	5	6	7
n_i	154.61	139.62	145.85	125.48	142.74	117.18	92.52
k_i	101	91	94	83	93	75	60
$\bar{\varepsilon}$	1.535	1.535	1.535	1.535	1.535	1.535	1.535
$K_i = n_i/\bar{\varepsilon}$	100.73	90.96	95.02	81.75	92.99	76.34	60.27
K_i	101	91	95	82	93	76	60
$\Delta K_i = \lvert K_i - k_i \rvert$	0	0	1	1	0	1	0
$\Delta K_i / K_i$, %	0	0	1.06	1.20	0	1.33	0

расчетное и обозначается символом ε_0. Выражение для определения числа изображений треков частиц в кадре ПЗС-камеры при сканировании области измерений имеет следующий вид:

$$K = n/\varepsilon_0, \tag{5}$$

где K – расчетное значение количества изображений треков частиц в кадре телевизионной ПЗС-камеры, n – численное значение количества черных пикселей в пороговом изображении треков частиц в кадре, $\varepsilon_0 = 1.535$ – расчетное значение количества пикселей в изображении одного трека, общее для каждого следа в любом из кадров сканирования.

Исходной измеряемой физической величиной при сканировании зоны измерений является измерение количества M_i черного в пороговом изображении очередного кадра ПЗС-камеры с его оцифровкой и занесением в файл для последующей обработки.

Прежде чем приступить к поточному сканированию намеченной области измерений, следует определить постоянные: P – порога с его численным значением и ε_0 – числа пикселей, приходящихся на изображение одного следа частицы в кадре ПЗС-камеры.

После определения и оцифровки этих величин по команде оператора измеряются количества M_i черного в пороговых изображениях треков частиц в кадрах ПЗС-камеры при поточном сканировании области измерений с занесением значений M_i в файл для дальнейших вычислений численных значений величин n_i и K_i, где i – номер кадра.

Величины n_i и K_i описываются следующими выражениями:

$$n_i = M_i / P, \tag{6}$$

где M_i – величина переменная, P – величина постоянная;

Таблица 3. Сравнение измерений количества следов частиц способами поштучного и интегрального счета частиц

i	1	2	3	4	5	6	7
k_i, шт.	101	91	94	83	93	75	60
$K_i = f(M_i)$	100.723	90.958	95.016	81.745	92.990	76.338	60.247
K_i, шт.	101	91	95	82	93	76	60

Примечание: k_i – число следов частиц в кадре, посчитанных поштучно, $K_i = f(M_i)$ – число следов частиц в кадре, посчитанных интегральным способом, M_i – количество черного в кадре, i – номер кадра. Ошибка при поштучном счете на один трек при количестве треков в кадре в несколько десятков штук вполне допустима.

$$K_i = n_i / \varepsilon_0, \qquad (7)$$

где n_i – величина переменная, ε_0 – величина постоянная.

Сделав подстановку выражения (6) в выражение (7), получим равенство вида

$$K_i = (P\varepsilon_0)^{-1} M_i, \qquad (8)$$

где $P\varepsilon_0$ – величина постоянная при неизменных условиях измерений.

Из выражения (8) следует, что если предварительно перед измерениями вычислить постоянные значения порога P и количества пикселей ε_0 в изображении одного трека в кадре ПЗС-камеры, то определение числа треков в кадре сведется к единственному измерению количества черного в пороговом изображении треков в кадре, оцифрованного в контроллере числом M_i, которое по команде оператора, будучи умноженным на коэффициент $(P\varepsilon_0)^{-1}$, будет занесено в память компьютера как число треков в кадре с номером i.

Таким образом, выражение (8) является формулой интегрального счета частиц в поперечном сечении пучка однородного излучения, траектории которых пересекают плоскость твердотельного детектора, совмещенную с поперечным сечением пучка однородного излучения под одним и тем же углом.

Вывод формулы (8) основывается на технологии машинного зрения в области регистрации и анализа цифровых изображений [1].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложен способ интегрального счета треков частиц, основанный на технологии машинного зрения, в котором число следов частиц измеряется не на зарегистрировавшем их плоском твердотельном детекторе, а на его оптическом изображении, проектируемом на светочувствительную ПЗС-матрицу телевизионной ПЗС-камеры.

Предложенный способ интегрального счета изображений треков частиц позволяет получать распределения плотности излучения по поперечному сечению пучка однородных частиц с высокой достоверностью, составляющей (98–100)% (см. табл. 2), что может быть использовано для высокоточного радиобиологического контроля пучков [7, 8–10] в области лучевой медицины, спектроскопии ядер, а также в областях науки и техники, где используются трековые детекторы.

Приводим табл. 3, где показаны значения измерений количества треков частиц в кадре ПЗС-камеры методом поштучного счета и предложенным способом интегрального счета частиц, который при сканировании плоскости детектора сводится к одному отсчету количества черного в кадре ПЗС-камеры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО “ВИДЕОСКАН” В.П. Майорову за консультации и рекомендации по освоению нами работы с ПЗС-камерой, изготовленной под его руководством, а также сотруднику ОИЯИ (г. Дубна), начальнику сектора ЛФВЭ А.А. Балдину, за предоставленные образцы твердотельных детекторов, облученных на ускорителе ЛЯП ОИЯИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В.* Машинное зрение: задачи и возможности. Технологии машинного зрения. Регистрация и анализ цифровых изображений. Препринт. Москва, МЭИ, 2001.
2. *Алёшин Ю.Д., Колесников В.В., Силаев В.И.* // ПТЭ. 1997. № 2. С. 43.
3. *Смалюк В.В.* Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Новосибирск: Параллель, 2009.

4. *Алёшин Ю.Д., Исламов Т.А., Калинников В.Г. и др.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 72.
5. *Александров А.Б., Владимиров М.С., Гончарова Л.А. и др.* Автоматизация измерений в толстослойных ядерных эмульсиях при продольном облучении ядрами с энергией 1 ГэВ на нуклон с целью получения обзорной информации по зарядовым состояниям вторичных частиц. Препринт. М.: ФИАН, 2007.
6. *Бахмутова А.В., Дитлов В.А., Колыванова М.А.* // ПТЭ. 2018. № 5. С. 107. https://doi.org/10.1134/S0032816218050178
7. *Богаченко Д.Д., Дитлов В.А., Полозов П.А., Силаев В.И.* РФ Патент 2776093, 2022.
8. *Stelzer H.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 1998. V. 61. P. 650. https://doi.org/10.1016/S0920-5632(97)00633-6
9. *Torikoshi M., Minohara S., Kanematsu N., Komori M., Ranazawa M., Noda K., Miyahara N., Itoh H., Endo M., Kanai T.J.* // J. Radiat. Res. 2007. V. 48. P. A15. https://doi.org/10.1269/jrr.48.a15
10. *Akagi T., Higashi A., Tsugami H., Sakamoto H., Masuda Y., Hishikawa Y.* // Phys. Med. Biol. 2003. V. 48. № 22. P. 301. https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/22/N01