

УДК 621.396.9

## РАЗРАБОТКА ОДНОКООРДИНАТНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ПУЧКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. В. М. Аульченко<sup>a</sup>, А. А. Глушак<sup>a, b, c, d, e, \*</sup>, В. В. Жуланов<sup>a, b</sup>,  
В. М. Титов<sup>a</sup>, Л. И. Шехтман<sup>a, b, d</sup>

<sup>a</sup>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

<sup>b</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090 Россия

<sup>c</sup>Центр коллективного пользования СКИФ Института катализа им. Г.К. Борескова,  
Новосибирск, 630090 Россия

<sup>d</sup>Томский государственный университет, Томск, 634050 Россия

<sup>e</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, 630073 Россия

\*e-mail: A.A.Glushak@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 11.11.2022 г.

После доработки 17.01.2023 г.

Принята к публикации 17.01.2023 г.

В статье описан однокоординатный детектор для дифракционных экспериментов с применением синхротронного излучения, разработка которого ведется в Институте ядерной физики СО РАН. До недавнего времени для этих целей в институте использовали разработанный ранее детектор ОД-3М с вычисляемыми каналами, основанный на технологии многопроволочных пропорциональных камер. Для обеспечения пространственного разрешения лучше 100 мкм при регистрации фотонов с энергией в широком диапазоне (3–30 кэВ) необходимо применение твердотельных микрополосковых или матричных сенсоров в сочетании со специализированными интегральными схемами регистрации. Новый детектор SOCOD, в котором в качестве регистрирующего элемента использован микрополосковый сенсор на основе арсенида галлия, работает в режиме прямого счета фотонов с энергией 3–30 кэВ и обеспечивает пространственное разрешение лучше 100 мкм при быстродействии до 1 МГц/канал. В статье дано общее описание текущей версии детектора, структурной схемы регистрирующего канала, программного обеспечения, позволяющего управлять работой детектора и отображать полученные результаты, и разработанного алгоритма выравнивания порогов срабатывания в каналах. Приведены результаты электронных тестов, работы алгоритма выравнивания и их обсуждение.

**Ключевые слова:** дифракционные эксперименты, координатные детекторы, режим счета фотонов, электронный канал регистрации, микрополосковый сенсор, специализированная интегральная микросхема, система на кристалле, алгоритм выравнивания счета, порог регистрации, счетная характеристика.

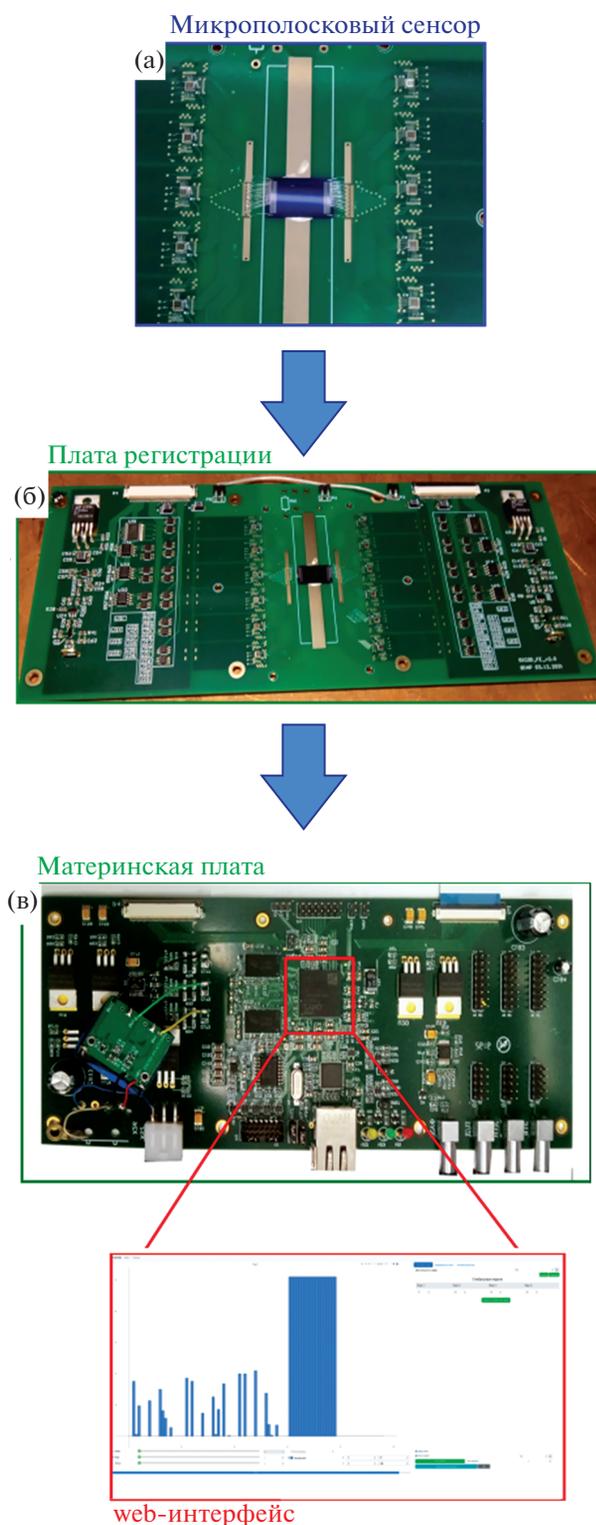
DOI: 10.31857/S1028096023080034, EDN: OVKFXJ

### ВВЕДЕНИЕ

Уже более четверти века синхротронное излучение (СИ) используют в исследованиях динамики быстрых физических и химических процессов. Короткие вспышки излучения, генерируемые в источниках СИ электронными сгустками, позволяют проводить измерения с высоким временным и пространственным разрешением с использованием соответствующих детекторов. На данный момент лучших результатов в таких экспериментах достигают с помощью многоканальных координатных детекторов на основе полупроводнико-

вых сенсоров с полосковыми или матричными структурами в качестве чувствительных детектирующих элементов, где каждый канал работает либо в интегрирующем, либо в счетном режиме [1–4].

Счетный режим работы детекторов используют для исследования относительно медленных процессов. В этом режиме регистрируют сигналы от отдельных фотонов, что в сочетании с потенциальной возможностью селекции фотонов по энергии открывает возможности получения бо-



**Рис. 1.** 96-канальный прототип счетного детектора SOCOD: микрополосковый сенсор на основе GaAs (а); плата регистрации с микрополосковым сенсором и ИС регистрации; материнская плата, управляющая работой детектора, содержащая ПЛИС под управлением операционной системы LINUX с web-интерфейсом (в).

лее детальной информации об исследуемых процессах.

В ИЯФ СО РАН детекторы для экспериментов с использованием СИ разрабатывают, изготавливают и используют на источниках СИ ВЭПП-3 и ВЭПП-4 уже более двадцати лет [5–15]. В частности, детектор ОД-3М, основанный на технологии многопроволочных пропорциональных камер, имеет 64 физических и 3300 вычисляемых на их основе каналов, обладает пространственным разрешением  $\sigma \sim 180$  мкм при энергии фотонов 8 кэВ. На данный момент два таких детектора работают на каналах СИ Сибирского Центра Синхротронного и Терагерцового излучения (СЦСТИ) в ИЯФ СО РАН [16–18].

В настоящее время в институте ведётся разработка однокоординатного рентгеновского детектора SOCOD, работающего в режиме прямого счета фотонов. Детектор должен обеспечивать пространственное разрешение лучше 100 мкм и угловое разрешение порядка  $0.01^\circ$ , частоту смены кадров более 10 кГц, а также быстродействие до 1 МГц/канал, необходимое для достижения высокой скорости записи результатов измерений.

#### СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕТЕКТОРА

Устройство счетного детектора SOCOD представлено на рис. 1. Детектор состоит из микрополоскового сенсора на основе арсенида галлия (GaAs) с шагом полосок 50 мкм и длиной полосок 10 мм (сенсор предоставлен Центром “Перспективные технологии в микроэлектронике” Томского государственного университета). Каждая полоска сенсора подключена к электронному регистрирующему каналу специализированной интегральной микросхемы. Управление регистрирующими каналами и съем данных осуществляется с помощью программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Передача данных на компьютер пользователя происходит с помощью встроенного в ПЛИС процессора.

Структура регистрирующего канала представлена на рис. 2. Он состоит из формирующего усилителя с коэффициентом преобразования 400 мВ/фКл, 4 компараторов с управляемыми порогами срабатывания (глобальными и индивидуальными), 4-5-разрядных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) для установки индивидуальных порогов, 4-8-разрядных счетчиков, считающих число срабатываний компараторов в течение заданного интервала времени (время кадра). По окончании времени кадра информация из счетчиков перепиывается в выходной сдвиговый регистр и далее сохраняется во внешней памяти.

Регистрирующие каналы имеют два типа управляемых порогов: глобальные и индивидуальные.

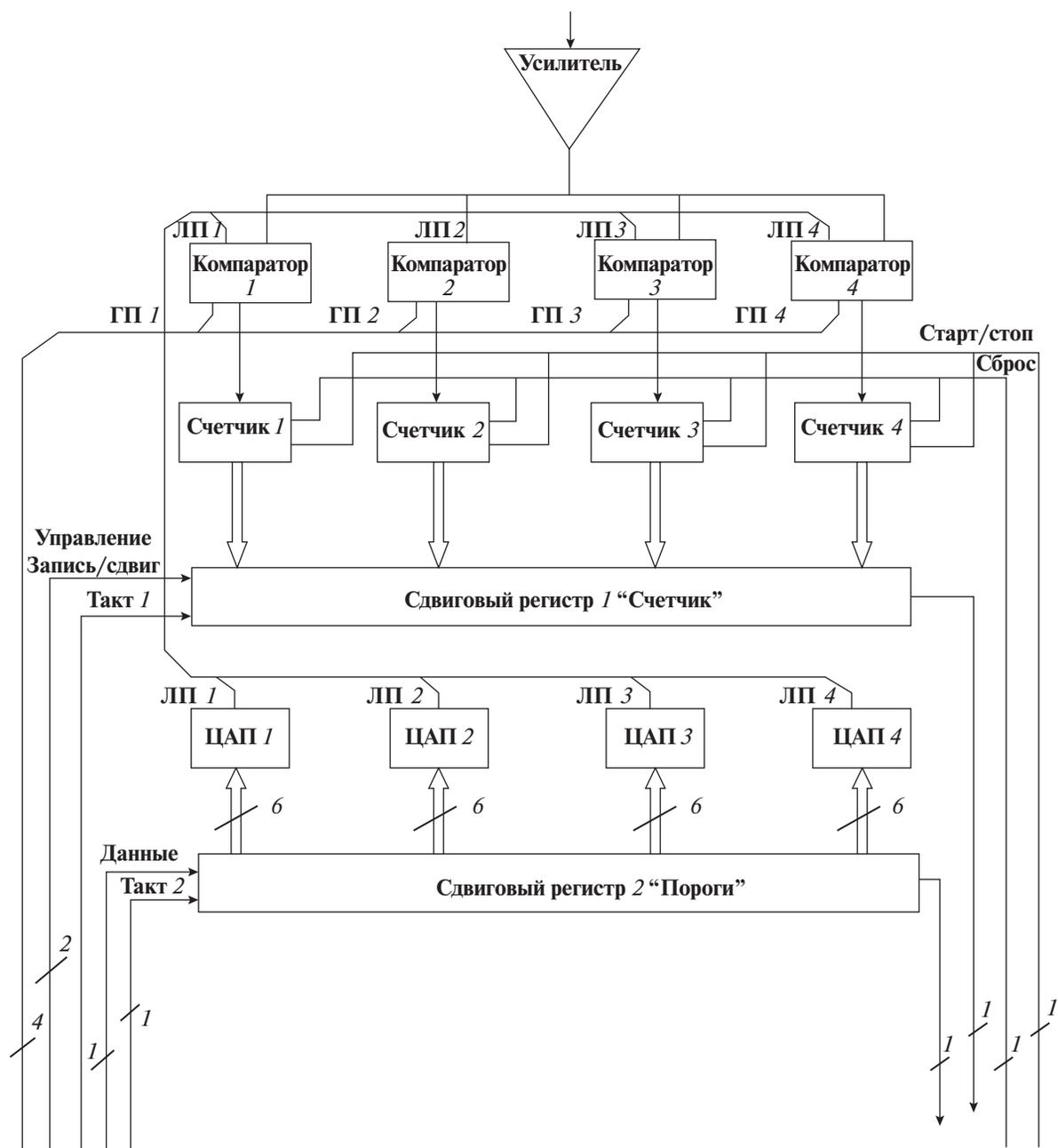


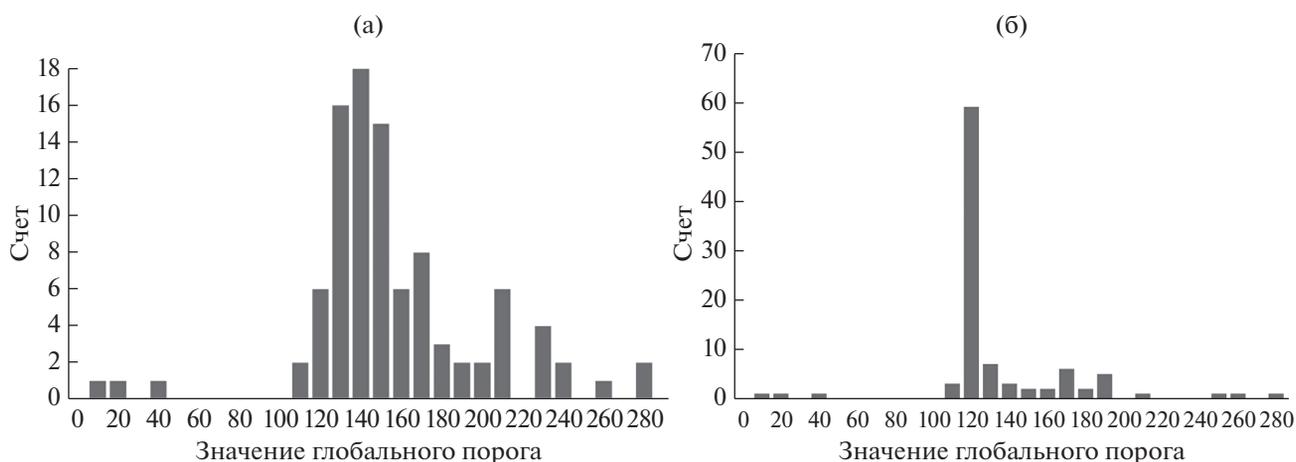
Рис. 2. Структура регистрирующего канала детектора.

Глобальные пороги задаются внешними по отношению к ИС регистрации 6-разрядными ЦАП. Диапазон установки глобальных порогов составляет (0–1.5) фКл, индивидуальных (0–0.2) фКл. Уровни глобальных порогов подаются на четыре компаратора каждого чипа, подстройка каждого регистрирующего канала осуществлена с помощью индивидуальных порогов. Глобальные пороги служат для выделения до четырех энергетических зон в регистрируемом потоке квантов. Количество энергетических зон выбрано на основе анализа условий планируемых экспериментов. Индивидуальные пороги служат для вырав-

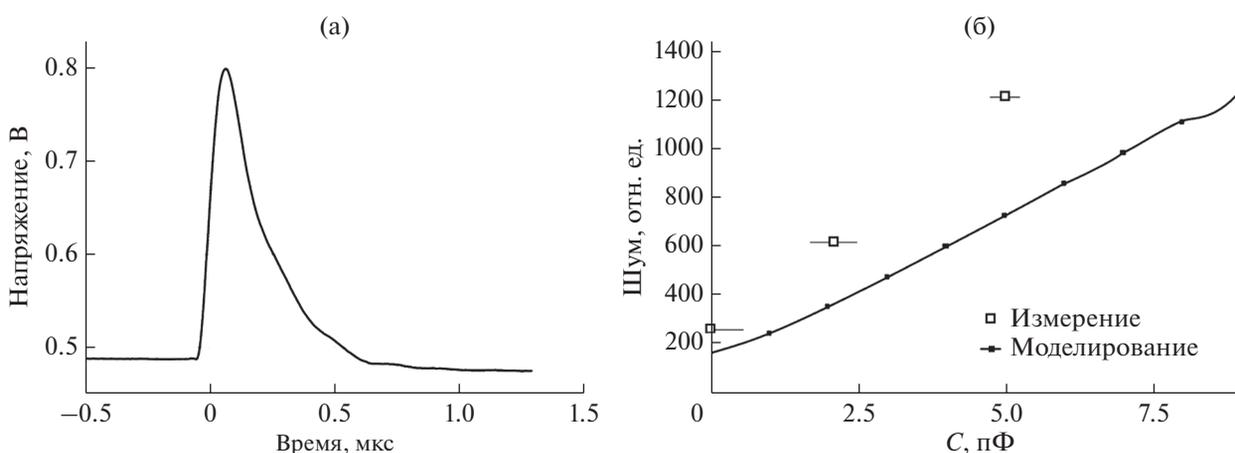
нивания счетных характеристик регистрирующих каналов.

Счетная характеристика – зависимость скорости счета от порога компаратора при данной величине входного сигнала. Величина суммы индивидуального и глобального порогов, при которой скорость счета составляет 50% от максимального значения, равна средней величине сигнала на входе компаратора, которая, в свою очередь, пропорциональна величине входного сигнала.

Для работы с детектором разработано программное обеспечение, которое содержит дизайн



**Рис. 3.** Гистограммы распределения величин глобальных порогов, соответствующих 50% скорости счета, до (а) и после (б) применения алгоритма автоматической установки индивидуальных порогов.



**Рис. 4.** Форма сигнала на выходе формирующего усилителя при входном сигнале, соответствующем 31.1 кэВ (а) и зависимость шума, приведенного ко входу, от емкости источника сигнала на входе (б).

ПЛИС и процессорную систему с Web-интерфейсом для управления работой детектора, отображения величины счета в каждом канале и ресурсы для измерения счетных характеристик. Также интерфейс содержит алгоритм автоматической установки индивидуальных порогов для выравнивания счетных характеристик каналов, что является принципиально важным для обеспечения однородности шкалы детектора. Задачей алгоритма является установка одинаковых значений порогов для наибольшего числа регистрирующих каналов.

Алгоритм состоит из трех этапов: измерительного, вычислительного и этапа коррекции. На первом этапе измеряются счетные характеристики каналов и рассчитываются величины порогов, соответствующих 50% счета. На втором этапе по данным вычислений выполняется поиск оптимального значения порога, для которого в диапазоне подстройки индивидуальных порогов нахо-

дится наибольшее число найденных на первом этапе порогов, соответствующих 50% счета отдельных каналов. На третьем этапе по величине отклонений этих порогов от оптимального вычисляются коды коррекции всех каналов и записываются в ЦАП индивидуальных порогов.

Результаты работы алгоритма представлены рис. 3. Из гистограмм распределения величин глобальных порогов, соответствующих 50% скорости счета в каналах, видно, что удается сделать одинаковыми примерно 60% каналов.

#### ТЕКУЩИЙ СТАТУС РАЗРАБОТКИ

К настоящему времени были подробно изучены характеристики регистрирующей электроники прототипа. В частности, измерены коэффициенты преобразования усилителей и смещение базовых уровней на входах компараторов. На рис. 4а

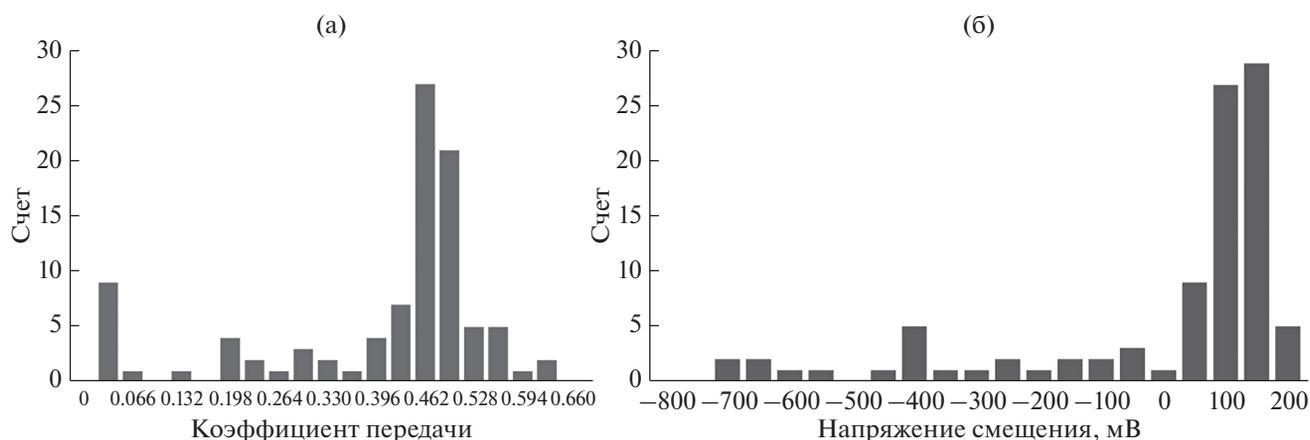


Рис. 5. Гистограммы распределения коэффициента передачи (а) и смещения базовой линии (б).

представлена форма сигнала на выходе формирующего усилителя, измеренная с помощью широкополосного цифрового осциллографа. Измеренный сигнал по величине и форме хорошо совпадает с результатами моделирования и соответствует времени формирования  $\sim 300$  нс.

Зависимость шума от емкости на входе (рис. 4б) примерно в три раза выше, чем по результатам моделирования. В то же время следует отметить, что при нулевой емкости на входе результат измерения совпадает с моделированием. Причина появления избыточных шумов обнаружена и заключается в плохой фильтрации низкочастотных шумов в источнике опорных напряжений. Этот недостаток будет устранен в процессе коррекции микросхемы.

Также были измерены счетные характеристики каждого канала детектора с подключенным сенсором и без него. На основании полученных характеристик были определены коэффициенты передачи каналов (рис. 5а) и смещения базовых линий (рис. 5б). Из рисунка видно, что имеется значительный разброс коэффициентов передачи и смещении базовых линий усилителей. Этот разброс будет существенно снижен в процессе коррекции параметров специализированной интегральной схемы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и изготовлен восьмиканальный прототип специализированной интегральной микросхемы регистрации для детектора SOCOD, предназначенного для регистрации СИ. На его основе собран 96-канальный прототип одноканального детектора, разработан дизайн ПЛИС и программное обеспечение. Были проведены измерения основных характеристик регистрирующих каналов и электронные тесты. В будущем планируется проведение физических измерений

совокупных характеристик детектора (сенсор и электроника) на пучке СИ в условиях реального эксперимента, а также проектирование и производство полноформатной интегральной схемы на 64 канала.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа по монтажу детектора SOCOD была частично профинансирована из средств гранта РФФИ 19-29-12045. Работы по измерению характеристик детектора SOCOD выполнены при частичной поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schmitt B. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003. V. 501. P.267. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)02045-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)02045-4)
2. *Bergamaschi A. et al.* // J. Synchrotron Rad. 2010. V. 17. P. 653. <https://doi.org/10.1107/S0909049510026051>
3. *Heijne E.H.M.* // Radiation Measurements. 2021. V. 140. P. 106436. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2020.106436>
4. *Mozzanica A., Bergamaschi A., Dinapoli R. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 607. P. 250. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.03.166>
5. *Aulchenko V.M., Zhulanov V.V., Kulipanov G.N. et al.* // Physics-Uspekhi. 2018. V. 61. № 6. P. 515. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.01.038339>
6. *Pruel E.R., Ten K.A., Tolochko B.P. et al.* // Technical Phys. 2013. V. 58. № 1. P. 24. <https://doi.org/10.1134/S1028335813010035>
7. *Titov V.M., Pruel E.R., Ten K.A. et al.* // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2011. V. 47. № 6. P. 615. <https://doi.org/10.1134/S0010508211060013>

8. *Aulchenko V., Ponomarev S., Shekhtman L. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2003. V. 513. P. 388. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.08.067>*
9. *Aulchenko V., Zhulanov V., Shekhtman L. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2005. V. 543. P. 350. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.01.254>*
10. *Aulchenko V.M., Evdokov O.V., Shekhtman L.I. et al. // J. Instrumentation. 2008. V. 3. P. 05005. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/05/P05005>*
11. *Aulchenko V.M., Evdokov O.V., Shekhtman L.I. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2009. V. 603. P. 73. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.163>*
12. *Aulchenko V.M., Baru S.E., Evdokov O.V. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2010. V. 623. P. 600. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.083>*
13. *Shekhtman L.I., Aulchenko V.M., Kudryavtsev V.N. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 189. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.033>*
14. *Aulchenko V., Prueel E., Shekhtman L., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2017. V. 845. P. 169. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.096>*
15. *Shekhtman L.I., Aulchenko V.M., Zhulanov V.V. et al. // Bulletin of the RAS: Phys. 2019. V. 83. № 2. P. 220. <https://doi.org/10.3103/S1062873819020254>*
16. *Aulchenko V.M., Bukin M.A., Velikzhanin Yu.S. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1998. V. 405. P. 269. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00169-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00169-1)*
17. *Aulchenko V.M., Evdokov O.V., Kutovenko V.D. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2009. V. 603. P. 76. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.164>*
18. *Aulchenko V.M., Baru S.E., Sidorov V.A. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1983. V. 208. Iss. 1–3. P. 443. [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(83\)91166-3](https://doi.org/10.1016/0167-5087(83)91166-3)*

## Development of a One-Dimensional Counting Detector for Diffraction Experiments at a Synchrotron Radiation Beam

V. M. Aulchenko<sup>1</sup>, A. A. Glushak<sup>1, 2, 3, 4, 5, \*</sup>, V. V. Zhulanov<sup>1, 2</sup>, V. M. Titov<sup>1</sup>, L.I. Shekhtman<sup>1, 2, 4</sup>

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>3</sup>*Synchrotron Radiation Facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>4</sup>*Tomsk State University, Tomsk, 634050 Russia*

<sup>5</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073 Russia*

\*e-mail: [A.A.Glushak@inp.nsk.su](mailto:A.A.Glushak@inp.nsk.su)

The article describes a one-coordinate detector for diffraction experiments on a synchrotron radiation beam. The detector is being developed at the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS. Until recently the Institute was developing gas one-coordinate detectors, in particular a one-coordinate detector with calculated channels OD-3M, based on the technology of multi-wire proportional cameras. To provide a spatial resolution of better than 100 microns at photon energy in a wide energy range (3–30 keV), it is necessary to use solid-state microstrip or matrix sensors in combination with specialized integrated registration circuits. The developed SOCOD detector, using a microstrip sensor based on gallium arsenide as a recording element, operates in the mode of direct counting of photons with an energy of more than 3–4 keV and a speed of up to 1 MHz/channel. The article gives a general description of the current version of the detector, the block diagram of the recording channel, the software that allows users to control the operation of the detector and display the results obtained, and the developed algorithm for leveling the trigger thresholds in the channels. The results of electronic tests, the work of the alignment algorithm and their discussion are presented.

**Keywords:** diffraction experiments coordinate detectors, photon counting mode, electronic registration channel, microstrip sensor, specialized integrated circuit, system-on-a-chip, counting alignment algorithm, registration threshold, counting characteristic.