

УДК 621.396.9

## МИКРОПОЛОСКОВЫЙ КРЕМНИЕВЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ НА ПУЧКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. В. М. Аульченко<sup>a</sup>, А. А. Глушак<sup>a, c, d</sup>, В. В. Жуланов<sup>a</sup>, А. Н. Журавлев<sup>a, c</sup>,  
В. А. Киселев<sup>a</sup>, В. Н. Кудрявцев<sup>a, b</sup>, П. А. Пиминов<sup>a, c</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

\*e-mail: L.I.Shekhtman@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 12.01.2023 г.

После доработки 20.03.2023 г.

Принята к публикации 20.03.2023 г.

В статье описано текущее состояние разработки прототипа детектора для изучения быстропротекающих процессов (DIMEX) основанного на кремниевом микрополосковом сенсоре. Кремниевый микрополосковый сенсор изготовлен из кремния *n*-типа с *p*-имплантами в форме полосок. На полоски по всей длине нанесены алюминиевые контакты с площадками для микросварки на концах. Сигналы с полосок считываются с помощью специально разработанной для этого проекта интегральной схемы DMXS6A, которая содержит шесть регистрирующих электронных каналов со схемой компенсации темного тока на входе, четырьмя интеграторами, 32 ячейками аналоговой памяти и аналоговым сдвиговым регистром. Каждая полоска сенсора соединена с охранным кольцом через резистор 400 Ом и со входом канала регистрации через резистор 100 кОм. Такой резистивный делитель на входе канала регистрации позволяет адаптировать динамический диапазон интегратора микросхемы регистрации к полному диапазону изменения потока фотонов в канале вывода синхротронного излучения № 8 накопителя ВЭПП-4М, оснащенного девятиполюсным вигглером с полем 1.95 Тл в качестве источника синхротронного излучения. Измерения динамического диапазона прототипа DIMEX-Si показали, что максимальный поток, который может быть зарегистрирован в линейном режиме, превышает  $10^5$  фотонов/канал от каждого сгустка электронов в накопителе. Также была продемонстрирована способность детектора регистрировать сигналы от сгустков, следующих через 55 нс в многосгустковом режиме, имитирующем работу строящегося в Новосибирской области источника синхротронного излучения поколения 4+ СКИФ, на котором планируется применять такой детектор.

**Ключевые слова:** быстропротекающие процессы, детонационные процессы, координатные детекторы, детекторы с временным разрешением, электронный канал регистрации, микрополосковый кремниевый детектор, специализированная интегральная схема, синхротронное излучение.

**DOI:** 10.31857/S1028096023120038, **EDN:** AYRQNA

### ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в Центре коллективного пользования “Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения” (ЦКП СЦСТИ) активно развивают методики исследования быстропротекающих процессов с помощью пучков синхротронного излучения (СИ). На двух источниках СИ, работающих в ЦКП СЦСТИ, накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М работают станции “Суб-микросе-

кундная диагностика” и “Экстремальное состояние вещества” [1–3].

Основным регистрирующим устройством на обеих станциях является детектор DIMEX-G (Detector for imaging of explosions), основанный на многоэлементной газовой ионизационной камере высокого давления, наполненной смесью Xe + 25% CO<sub>2</sub> при давлении 7 атм. [4–9]. DIMEX-G регистрирует сигналы СИ от каждого сгустка электронов в накопителе и записывает их во внут-

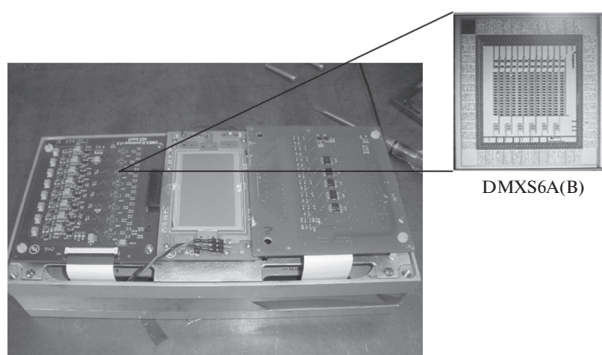


Рис. 1. Фотография прототипа DIMEX-Si с топологией специализированной ИС DMXS6A регистрации излучения (на вставке).

реннюю память до появления сигнала от следующего сгустка. Таким образом, этот детектор записывает изображение тени от быстро движущегося объекта каждые 125 нс на ВЭПП-3 (двухсгустковый режим) и каждые 200 нс на ВЭПП-4М (шестисгустковый режим). DIMEX-G — однокоординатный детектор, имеющий 512 каналов, расположенных с шагом 100 мкм. Максимальный сигнал, который детектор может зарегистрировать в линейном режиме соответствует потоку ~2000 фотонов/канал от одного сгустка электронов (энергия фотонов 20 кэВ). Детектор может записать в процессе эксперимента до 100 кадров, максимальная частота записи — 10 МГц. Пространственное разрешение DIMEX-G составляет 250 мкм при средней энергии фотонов в спектре СИ 20 кэВ, квантовая эффективность достигает 40%.

DIMEX-G эффективно используют уже более 17 лет на ВЭПП-3 и более семи лет на ВЭПП-4М для исследований детонационных и ударно-волновых процессов [10–13]. Тем не менее, этот детектор имеет ряд существенных ограничений и для дальнейшего улучшения его параметров требуются значительные изменения конструкции как самого детектирующего элемента, так и электроники регистрации. Так, максимальный поток фотонов, который может регистрировать DIMEX-G, ограничен из-за накопления объемного заряда ионов в газе. Максимальная скорость записи кадров ограничена из-за низкой скорости дрейфа и продольной диффузии электронов, а также из-за недостаточной скорости работы электроники регистрации. Пространственное разрешение лимитировано поперечной диффузией электронов в газе. Все эти проблемы можно решить переходом от газовой технологии на твердотельную и заменой газовой ионизационной камеры на микрополосковый кремниевый детектор с быстродействующей электроникой регистрации [14–19]. Подвижность дырок в кремнии всего в два раза меньше, чем электронов, в отличие от ксенона, где ионы медленнее электронов более чем на три порядка. Также, сама величина подвижности носителей в

кремнии выше, чем в газе, а напряженность электрического поля в кремниевом сенсоре и в газовом зазоре близки. Таким образом, эффекты объемного заряда в кремниевом сенсоре будут проявляться при существенно более высоком потоке фотонов по сравнению с газовым детектором.

### ПРОТОТИП КРЕМНИЕВОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО ДЕТЕКТОРА

Для исследования основных параметров детектора на основе кремниевого микрополоскового сенсора был создан прототип DIMEX-Si [16–18] (рис. 1). Прототип включает в себя кремниевый сенсор с чувствительной областью  $30 \times 51$  мм, изготовленный фирмой Hamamatsu Photonics. Чувствительная область покрыта 512 полосками длиной 30 мм и расположенными с шагом 50 мкм. Каждая полоска представляет собой *p*-имплант на *n*-кремнии, покрытый алюминиевым металлическим контактом. Толщина сенсора 320 мкм. Полоски соединены с заземленным охранным кольцом через резисторы 400 Ом. Напряжение смещения, подаваемое на общий электрод на противоположной стороне сенсора, составляет 300 В.

В центральной части сенсора 96 полосок соединены с помощью микросварки с электронной регистрацией, основанной на специализированной интегральной схеме (ИС) DMXS6A(B), разработанной специально для этого проекта [19]. ИС содержит 6 каналов, каждый включает в себя преобразователь напряжения в ток, схему компенсации темнового тока, четыре интегратора с цепью сброса, 32 ячейки аналоговой памяти (по 8 ячеек на интегратор) и выходной аналоговый сдвиговый регистр (рис. 2). На входе каждого канала имеется последовательно включенный резистор 10 кОм (в дальнейшем увеличенный до 100 кОм, как показано ниже). Резистор 400 Ом на сенсоре и резистор 10 кОм (100 кОм) на плате регистрации обеспечивают ослабление входного тока в канал ИС DMXS6A(DMXS6B), чтобы адаптировать динамический диапазон интеграторов к диапазону зарегистрированного потока фотонов в сенсоре.

Прототип DIMEX-Si с первой версией ИС DMXS6A, был исследован в более ранних работах [17–19]. Было показано, что кремниевый микрополосковый детектор действительно дает возможность существенно повысить максимальный регистрируемый поток фотонов от одного сгустка электронов в накопителе, улучшить пространственное и временное разрешение, а новая электроника регистрации дает возможность повысить частоту записи кадров до 40 МГц. Однако существенным недостатком новой ИС был высокий уровень шума, который не позволял повысить отношение сигнала к шуму по сравнению с газовым детектором [18, 19]. В результате моделирования и дальнейшего анализа был найден источник повышенного шума. Им оказалась схема компенса-

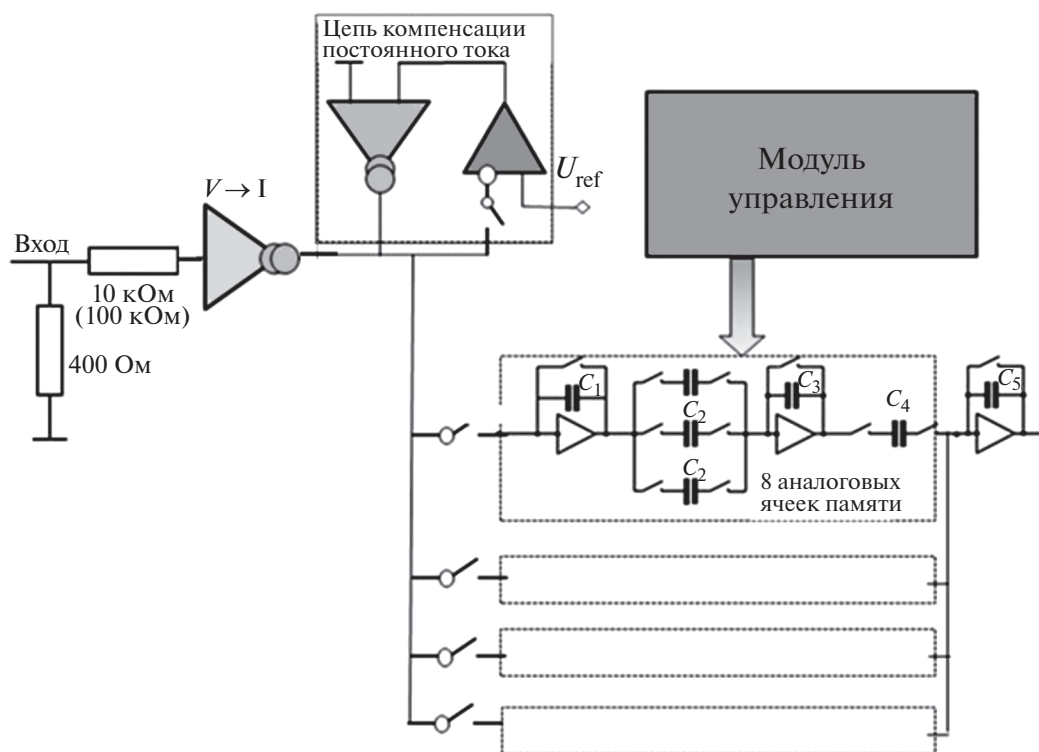


Рис. 2 Блок-схема ИС DMXS6A с резистивным делителем на входе канала регистрации (не входит в состав ИС).

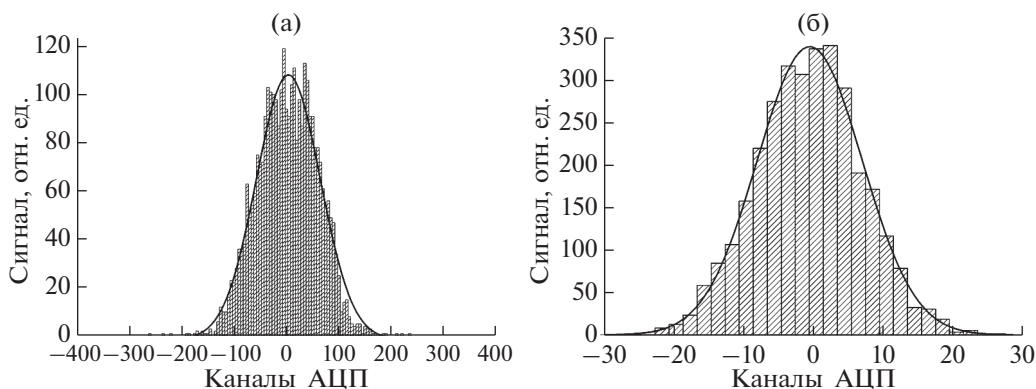
ции темнового тока. В этой схеме выход усилителя в цепи обратной связи оставался подключенным к управляющему входу генератора компенсирующего тока во время экспозиции. В то же время вход усилителя в обратной связи в этой фазе был отключен от цепи сигнала. В результате, шум на выходе усилителя в обратной связи существенно возрастал, что приводило к соответствующему увеличению шума тока компенсации. В новой версии ИС DMXS6B в схему компенсации темнового тока был добавлен ключ, отключающий выход усилителя в обратной связи от управляющего входа генератора тока компенсации. Напряжение обратной связи сохранялось на специальной емкости, подключенной к управляющему входу генератора тока компенсации. Новая версия ИС была произведена в 2021 г., и все измерения, описанные в настоящей статье, сделаны с прототипом DIMEX-Si с электроникой регистрации на основе ИС DMXS6B.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРОТОТИПА DIMEX-Si С НОВОЙ ВЕРСИЕЙ ИС DMXS6B

Для измерения величины шума и сравнения шума в новой версии ИС регистрации со старой версией были набраны данные без облучения детектора. Сравнение гистограмм распределения сигнала в этих измерениях показаны на рис. 3 для DMXS6A (рис. 3а) и DMXS6B (рис. 3б). Шум (стандартное отклонение распределения сигнала)

с новой версией ИС уменьшился в восемь раз, с 61 до 7.5 бинов аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Для измерения зависимости сигнала в детекторе от поглощенного потока фотонов детектор облучали потоком СИ. Поток фотонов, падающий на детектор, задавали изменением высоты выходного отверстия коллиматора. Предварительно было проведено измерение полной энергии, поглощаемой в кремниевом сенсоре толщиной 320 мкм, с помощью мониторингового детектора с точно таким же сенсором, как и в DIMEX-Si. В мониторинговом детекторе одна полоска была подключена ко входу осциллографа и, таким образом, можно было измерить полный заряд, протекающий через один канал детектора при поглощении фотонов от одного сгустка электронов. Это измерение было проведено при одной фиксированной высоте выходного отверстия коллиматора, далее поток фотонов рассчитывали исходя из известной высоты выходного отверстия коллиматора и расчетной средней энергии фотонов в спектре поглощенного излучения, которая для перпендикулярного положения детектора по отношению к пучку равна 17 кэВ. На рис. 4 показан результат измерения зависимости сигнала в детекторе от высоты выходного отверстия коллиматора (нижняя шкала) и потока фотонов (верхняя шкала). Кроме того, поток фотонов был также рассчитан с помощью электронной калибровки (правая шкала). Для этого на вход канала регистрации подавали из-

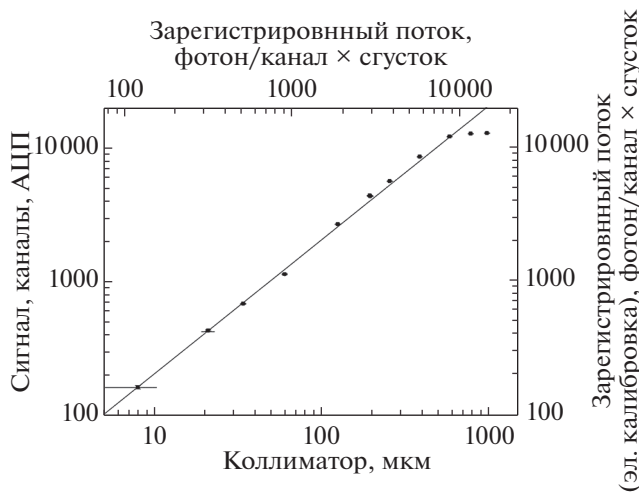


**Рис. 3.** Гистограммы распределения шумового сигнала, полученные без облучения детектора в двух версиях ИС регистрации: а – DMXS6A, стандартное отклонение шумового распределения равно 61 каналу АЦП; б – DMXS6B, стандартное отклонение шумового распределения равно 7.5 каналов АЦП.

вестный сигнал и по величине выходного сигнала рассчитывали калибровочную константу, определяющую величину бина АЦП в единицах заряда на входе. Из рис. 4 видно, что поток, рассчитанный с помощью электронной калибровки, совпадает с результатом, полученным с помощью измерения с мониторным детектором с точностью около 10%.

Из рис. 4 видно также, что при потоке около 10000 фотонов на канал от одного сгустка сигнал выходит на насыщение. Это связано с перегрузкой интеграторов в ИС регистрации. В этом измерении на входе каналов регистрации были включены резисторы 10 кОм. Таким образом, чтобы достичь максимального регистрируемого потока

в  $10^5$  фотонов/канал от одного сгустка, нужно еще в десять раз уменьшить входной ток, для чего резисторы на входе каналов должны быть увеличены до 100 кОм. Следует отметить, что собственный шум канала регистрации, равный 7.5 бинам АЦП (рис. 3), соответствует примерно семи фотонам с энергией 17 кэВ. Таким образом, статистические флуктуации сигнала при максимальном регистрируемом потоке в 10000 фотонов, равные 100 фотонам, существенно превышают собственный шум канала. Поток фотонов, при котором статистический шум сравним с собственным шумом канала, равен 49 фотонам/канал. Если принять это значение потока фотонов в качестве нижней границы динамического диапазона, то ширина динамического диапазона детектора в этом режиме равна  $\sim 200$ . В режиме с ослабленным в десять раз входным током собственный шум канала в 7.5 бинов АЦП соответствует статистическим флуктуациям потока в  $\sim 70$  фотонов. В этом случае значение потока, при котором статистический шум сравним с собственным шумом канала, равно, соответственно, 4900 фотонов/канал. Поскольку максимальная граница динамического диапазона достигает  $10^5$  фотонов/канал, ширина динамического диапазона в этом случае равна  $\sim 20$ .



**Рис. 4.** Зависимость сигнала на детекторе с ИС DMXS6A от высоты выходного отверстия коллиматора и поглощенного потока фотонов. На шкалах сверху и справа показано соответствие расчетам поглощенного потока на основе измерения мониторным детектором и с использованием электронной калибровки соответственно.

Для дополнительной проверки правильности оценки величины регистрируемого потока и шума были сделаны снимки малоконтрастного тест-объекта (рис. 5а). Тест-объект представляет собой блок из полиметилметакрилата с четырьмя ступеньками высотой 1 мм и шириной 2.5 мм. Данные, получаемые с детектора, представляют собой набор из 32 массивов по 96 чисел. Каждое число – это сигнал, полученный из соответствующего канала детектора. Массив из 96 чисел соответствует сигналу, полученному от одной вспышки СИ, в дальнейшем будем называть такой массив кадром. Весь набор из 32 кадров будем называть фильмом. Для получения изображения тест-объекта из первичных данных, полученных экспозицией тест-

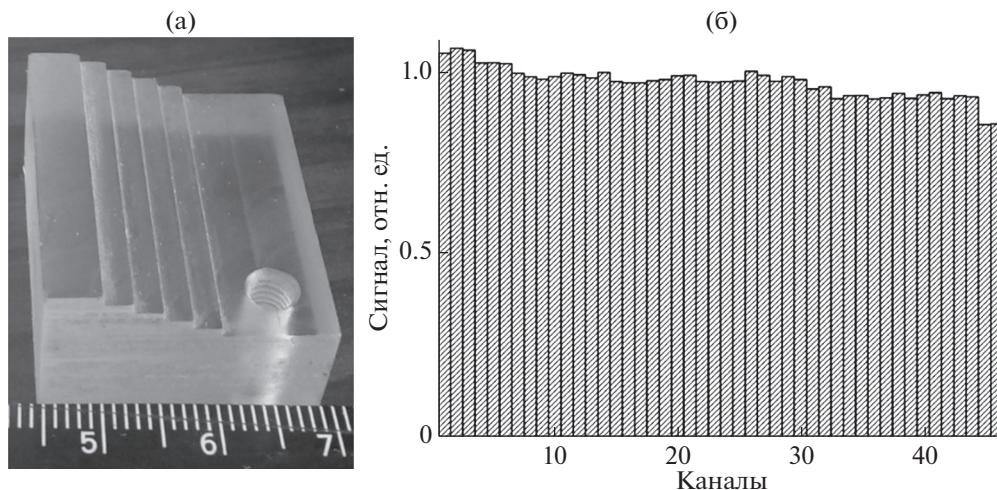


Рис. 5. Внешний вид тест-объекта (а) и изображение тест-объекта, полученное с помощью СИ в режиме с максимальным регистрируемым потоком фотонов 10000 фотонов/канал (б).

объекта в СИ, вычитали данные, полученные без облучения детектора. Далее данные нормировали на изображение “плоского поля”, т.е. на результат экспозиции детектора без тест-объекта с повышенной статистикой. Для получения изображения “плоского поля” было сделано 100 фильмов в режиме, идентичном режиму экспозиции тест-объекта, и усредненный результат использовали для нормировки. Одномерное изображение тест-объекта показано на рис. 5б. Из рисунка видно, что контрастность ступеньки полиметилметакрилата высотой 1 мм равна примерно 5%, а значение потока фотонов, вычисленное по величине флуктуаций сигнала (поток эквивалентный шуму, NEQ) равно примерно 10000 фотонов/канал.

Для получения максимального регистрируемого потока  $10^5$  фотонов/канал резисторы на входе каналов регистрации были заменены на с 10 кОм на 100 кОм, и все последующие измерения проводили с измененным вариантом электроники регистрации. Результат измерения зависимости сигнала от регистрируемого потока фотонов приведен на рис. 6. Из рисунка видно, что поток в  $10^5$  фотонов может быть зарегистрирован в этом режиме на самом краю линейного диапазона работы интеграторов.

Важным параметром детектора является его временное разрешение и предельная частота записи кадров. Эти параметры связаны друг с другом, поскольку временное разрешение детектора определяет минимальное время, необходимое для экспозиции и записи сигнала от одной вспышки СИ в аналоговую память. Временное разрешение и предельная частота записи кадров в основном определяются параметрами ИС регистрации, поскольку импульс тока с полосы сенсора от одной вспышки СИ длится всего несколько нс. Изучение временного разрешения детектора с ИС DMXS6B

проводили путем измерения зависимости сигнала в нескольких соседних кадрах от задержки между синхроимпульсом, задающим начало последовательности сигналов, управляющих работой ИС, и моментом вспышки СИ. Сравнение этих измерений для детекторов с первым вариантом ИС DMXS6A и с новой версией ИС DMXS6B приведено на рис. 7.

Временное разрешение детектора — это длительность фазы перехода от нулевого сигнала до

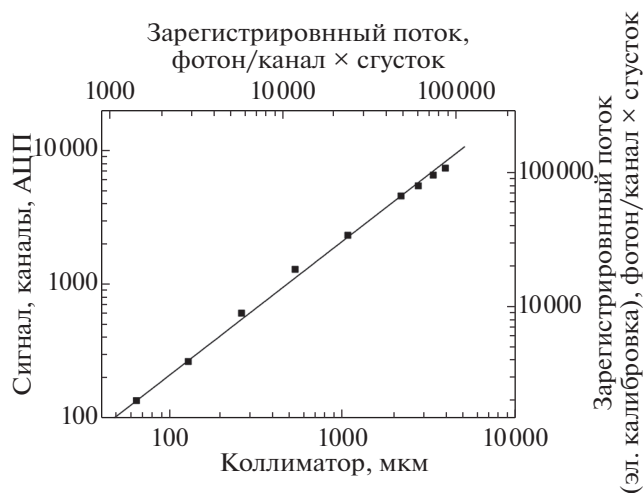
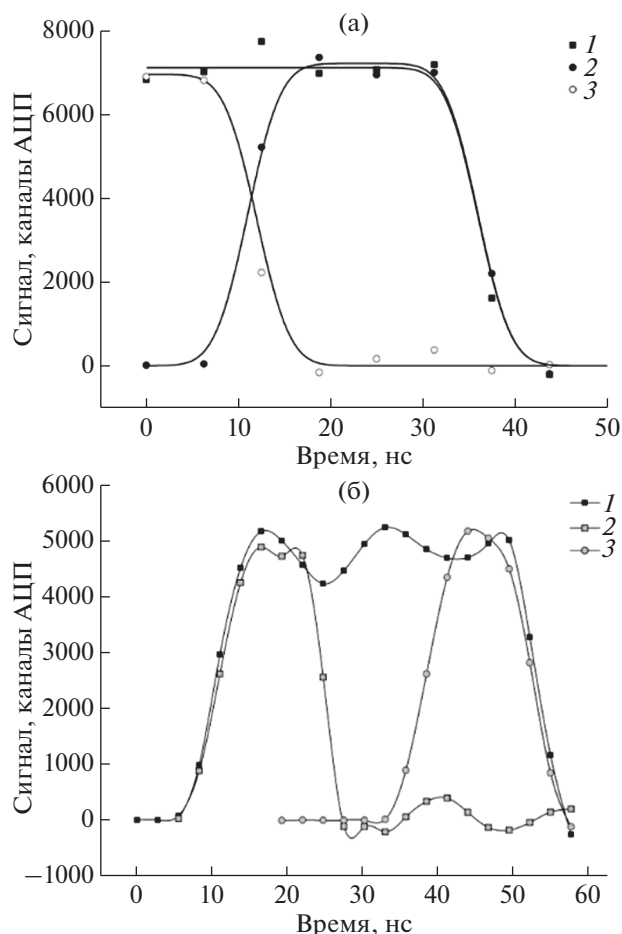


Рис. 6. Зависимость сигнала на детекторе с ИС DMXS6B от высоты выходного отверстия коллиматора и поглощенного потока фотонов с увеличенными резисторами на входе каналов регистрации. На шкалах сверху и справа показано соответствие расчетам поглощенного потока на основе измерения монитором детектором и с использованием электронной калибровки соответственно. Измерение проводили при перпендикулярном положении детектора по отношению к пучку СИ.



**Рис. 7.** Зависимость сигнала в двух соседних кадрах от задержки между синхроимпульсом детектора и моментом вспышки СИ на детекторе: а) с ИС DMXS6A, 1 – время экспозиции кадра 50 нс, кадр № 19, 2 – время экспозиции кадра 25 нс, кадр № 18, 3 – время экспозиции кадра 25 нс, кадр № 19; б) с ИС DMXS6B, 1 – время экспозиции кадра 55 нс, кадр № 9, 2 – время экспозиции кадра 27.5 нс, кадр № 9, 3 – время экспозиции кадра 27.5 нс, кадр № 8.

максимального сигнала в кадре. Это время равно свертке длительности токового импульса с полоски сенсора и постоянной времени интегратора (передний фронт), которая определяется верхним пределом полосы частот. В обоих вариантах ИС это время равно примерно 7 нс. В первом варианте ИС во временной последовательности сигналов присутствовала фаза, когда сигнал не равен нулю в обоих соседних кадрах. В этой фазе два интегратора одновременно присоединены к входному сигналу. В ИС DMXS6B эта фаза была убрана. Следует отметить, что первый интегратор отключается раньше, а второй интегратор подключается позже, чем в DMXS6A. Это привело к появлению фазы, в которой сигнал отсутствует и в первом, и во втором кадре. Такая особенность временной диаграммы помогла дополнительно снизить уровень шума, однако из-за этого значительно

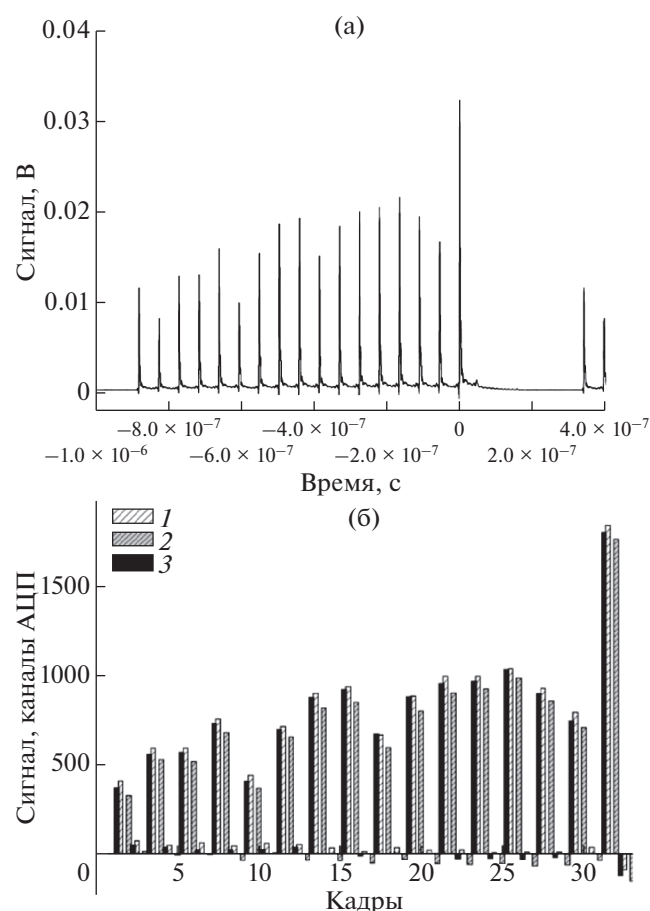
уменьшилась длительность фазы максимального сигнала в кадре, которая при периоде следования кадров 27.5 нс, составляет всего около 5 нс. Малая длительность фазы максимального сигнала в кадре означает, что требования к стабильности синхроимпульсов детектора относительно пролета сгустков в накопителе должна быть повышена. Кроме того, это означает, что максимальная частота записи кадров не может превышать 40 МГц.

Для работы с DIMEX-Si в накопителе должна быть создана последовательность электронных сгустков, расстояние между которыми равно или кратно периоду следования кадров в детекторе. Схема компенсации темнового тока, которая обеспечивает стабильный нулевой уровень сигнала в отсутствие облучения, должна быть отключена во время экспозиции. Важно, чтобы в момент отключения на входах каналов регистрации отсутствовал сигнал с сенсора. Для этого в последовательности электронных сгустков в накопителе должен быть разрыв в 200–300 нс. Для изучения возможности работы детектора в многосгустковом режиме на ВЭПП-4М был реализован режим с последовательностью из 17 электронных сгустков, следующих с интервалом 55 нс. В первом измерении в этом режиме важно было понять принципиальную возможность работы, которая, в частности, определяется свойствами схемы компенсации темнового тока. На рис. 8а показана осциллограмма сигнала с одной полоски мониторингового кремниевого детектора, которая показывает зависимость тока сенсора от времени.

На рис. 8а видны сигналы от 17 сгустков с различным током и разрыв в их последовательности длительностью примерно 330 нс. Для стабильной работы ИС DMXS6B схема компенсации темнового тока должна быть отключена перед началом экспозиции во время этого разрыва. На рис. 8б показаны сигналы в одном из каналов детектора в трех последовательных фильмах. Детектор работал с периодом смены кадров равным половине расстояния между сгустками, для того, чтобы видеть, насколько хорошо сигналы от разных сгустков можно разделить, а также каков уровень сигнала в отсутствии облучения между сгустками. Из рис. 8б видно, что сигнал флуктуирует от кадра к кадру примерно на 10%. Меняется как уровень сигнала в кадрах, соответствующих пролету сгустка, так и уровень сигнала в кадрах, где облучение отсутствует. Это свидетельствует о присутствии нестабильности синхроимпульсов, управляющих работой детектора, относительно моментов пролета сгустков, а также о возможном неоптимальном положении по времени момента отключения схемы компенсации темнового тока. Эти проблемы требуют дальнейшего изучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая версия ИС регистрации DMXS6B позволила значительно уменьшить уровень шума в



**Рис. 8.** Работа DIMEX-Si в многосгустковом режиме: (а) осциллограмма сигнала с одной полосы мониторингового детектора; (б) сигнал в одном канале в трех последовательных фильмах DIMEX-Si.

прототипе детектора DIMEX-Si. Испытания детектора на пучке СИ на накопителе ВЭПП-4М показали, что максимальный поток фотонов, который может быть зарегистрирован в линейном режиме при величине последовательного резистора на входе канала регистрации 10 кОм (ИС DMXS6A), составляет  $10^4$  фотонов/канал от одного электронного сгустка. При увеличении сопротивления резисторов до 100 кОм и соответствующем ослаблении доли тока, вытекающем из сенсора на вход каналов регистрации, максимальный регистрируемый поток увеличивается в десять раз и достиг  $10^5$  фотонов/канал от одного электронного сгустка (ИС DMXS6B). Этот результат исключительно важен с точки зрения увеличения точности измерений с использованием детектора DIMEX-Si при проведении экспериментов.

Временное разрешение детектора с новой версией ИС регистрации осталось таким же, как и с первой версией ИС. Временная диаграмма работы канала регистрации в новой версии ИС была изменена таким образом, что теперь требуется бо-

лее точная настройка и стабилизация работы синхронизации детектора с накопителем. В дальнейшем при разработке полноформатной интегральной схемы для финального варианта детектора нужно учесть возникшую проблему и сделать возможной гибкую регулировку параметров временной диаграммы ИС.

В процессе измерений был впервые реализован многосгустковый режим на накопителе ВЭПП-4М. Продемонстрирована принципиальная возможность работы детектора DIMEX-Si в режиме с заполнением кольца накопителя электронными сгустками, следующими через 55 нс, с разрывом в последовательности сгустков длительностью около 330 нс. Подобный режим будет реализован на источнике СИ СКИФ.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа по измерению характеристик детектора DIMEX-Si выполнена при частичной поддержке Правительством Российской Федерации, согласно Постановлению 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.).

**Конфликт интересов:** авторы утверждают, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tolochko B.P., Kosov A.V., Evdokov O.V., Zhogin I.L., Ten K.A., Prueel E.R., Shekhtman L.I., Aulchenko V.M., Zhulanov V.V., Piminov P.F., Nazmov V.P., Zolotarev K.V., Kulipanov G.N.* // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 427. <https://www.doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.072>
2. *Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., Berkkaev D.E., Borin V.M., Dorokhov V.L., Karnaev S.E., Kiselev V.A., Levichev E.B., Meshkov O.I., Mishnev S.I., Nikitin S.A., Nikolaev I.B., Sinyatkin S.V., Vobly P.D., Zolotarev K.V., Zhuravlev A.N.* // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 19. <https://www.doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.005>
3. *Aulchenko V.M., Zhulanov V.V., Kulipanov G.N., Ten K.A., Tolochko B.P., Shekhtman L.I.* // Physics-Uspekhi. 2018. V. 61. № 6. P. 515. <https://www.doi.org/10.3367/UFNe.2018.01.038339>
4. *Aulchenko V., Papushev P., Ponomarev S., Shekhtman L., Zhulanov V.* // J. Synchrotron Radiation. 2003. V. 10. № 5. P. 361. <https://www.doi.org/10.1107/S0909049503009142>
5. *Aulchenko V., Evdokov O., Ponomarev S., Shekhtman L., Ten K., Tolochko B., Zhogin I., Zhulanov V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003. V. 513. Iss. 1–2. P. 388. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2003.08.067>
6. *Aulchenko A., Zhulanov V., Shekhtman L., Tolochko B., Zhogin I., Evdokov O., Ten K.* // Nuclear Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2005. V. 543. Iss. 1. P. 350. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2005.01.254>
7. *Aulchenko V.M., Evdokov O.V., Shekhtman L.I., Ten K.A., Tolochko B.P., Zhogin I.L., Zhulanov V.V.* // J. Instrumentation. 2008. V. 3. № 5. P. P05005. <https://www.doi.org/10.1088/1748-0221/3/05/P05005>

8. *Aulchenko V.M., Eydokov O.V., Shekhtman L.I., Ten K.A., Tolochko B.P., Zhogin I.L., Zhulanov V.V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 603. Iss. 1–2. P. 73. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.163>
9. *Aulchenko V.M., Baru S.E., Eydokov O.V., Leonov V.V., Papishev P.A., Porosev V.V., Savinov G.A., Sharafutdinov M.R., Shekhtman L.I., Ten K.A., Titov V.M., Tolochko B.P., Vasiljev A.V., Zhogin I.L.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2010. V. 623. Iss. 1. P. 600. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.083>
10. *Ten K.A., Prueel E.R., Merzhievsky L.A., Luk'yanichikov L.A., Tolochko B.P., Zhogin I.L., Shekhtman L.I.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 603. Iss. 1. P. 160. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.192>
11. *Titov V.M., Prueel E.R., Ten K.A., Luk'yanichikov L.A., Merzhievskii L.A., Tolochko B.P., Zhulanov V.V., Shekhtman L.I.* // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2011. V. 47. № 6. P. 615. <https://www.doi.org/10.1134/S0010508211060013>
12. *Prueel E.R., Ten K.A., Tolochko B.P., Merzhievskii L.A., Luk'yanichikov L.A., Aulchenko V.M., Zhulanov V.V., Shekhtman L.I., Titov V.M.* // Doklady Physics. 2013. V. 58. № 1. P. 24. <https://www.doi.org/10.1134/S1028335813010035>
13. *Ten K.A., Prueel E.R., Kashkarov A.O., Rubtsov I.A., Antipov M.V., Georgievskaya A.B., Mikhailov A.L., Spirin I.A., Aulchenko V.M., Shekhtman L.I., Zhulanov V.V., Tolochko B.P.* // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2018. V. 54. № 5. P. 606. <https://www.doi.org/10.1134/S0010508218050143>
14. *Shekhtmana L.I., Aulchenko V.M., Kudryavtsev V.N., Kutovenko V.D., Titov V.M., Zhulanova V.V., Prueel E.L., Ten K.A., Tolochko B.P.* // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 189. <https://www.doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.033>
15. *Aulchenko V., Prueel E., Shekhtman L., Ten K., Tolochko B., Zhulanov V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2017. V. 845. P. 169. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.096>
16. *Shekhtman L.I., Aulchenko V.M., Zhulanov V.V., Kudashkin D.V.* // Bull. RAS: Phys. 2019. V. 83. № 2. P. 220. <https://www.doi.org/10.3103/S1062873819020254>
17. *Shekhtman L., Aulchenko V., Kudryavtsev V., Kutovenko V., Titov V., Zhulanov V.* // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. Iss. 1. P. 050004. <https://www.doi.org/10.1063/5.0030393>
18. *Shekhtman L., Aulchenko V., Kudashkin D., Kudryavtsev V., Prueel E., Ten K., Tolochko B., Zhulanov V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2020. V. 958. P. 162655. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2019.162655>
19. *Aulchenko V.M., Shekhtman L.I., Zhulanov V.V.* // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2020. V. 56. P. 81. <https://www.doi.org/10.3103/S8756699020010112>

## Microstrip Silicon Detector for Study of Ultra-Fast Processes at the Synchrotron Radiation Beam

V. M. Aulchenko<sup>1</sup>, A. A. Glushak<sup>1, 3, 4</sup>, V. V. Zhulanov<sup>1</sup>, A. N. Zhuravlev<sup>1, 3</sup>, V. A. Kiselev<sup>1</sup>, V. N. Kudryavtsev<sup>1, 2</sup>, P. A. Piminov<sup>1, 3</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>*Томский государственный университет, Томск, 634050 Россия*

\*e-mail: L.I.Shekhtman@inp.nsk.su

Present status of the development of the prototype of the Detector for imaging of explosions (DIMEX) based on silicon microstrip sensor is discussed. The prototype includes silicon *p-in-n* sensor with metal strips in direct contact with *p*-implants. Strips are 30 mm long and have 50 μm pitch. Signals from the strips are read out with specially developed ASICs DMXS6A, that include 6 channels with DC compensation circuit at the input, four integrators, 32 analogue memory cells and output analogue shift register. The prototype detector has 96 registration channels provided with 16 DMXS6A ASICs. Each strip of the sensor is connected to the guard-ring through a 400 Ohm resistor and through 100 kOhm resistor to the input of the front-end ASIC. This resistive divider allows to adapt the dynamic range of the integrator of the ASIC to the full flux range of the beam line 8 at the VEPP-4M storage ring that includes 9-pole wiggler with 1.9 T B-field as SR source. The measurements of the dynamic range of the DIMEX-Si prototype demonstrate that maximum photon flux from one bunch that can be measured by this detector exceeds 100000 photons per channel. For these measurements the sensor was inclined at an angle of 1.7 degrees with respect to the beam plane in order to increase quantum efficiency. The possibility to work in multi-bunch mode with bunches following in 55 ns is demonstrated, that proves that this detector can be successfully exploited at new SR-source SKIF that is under construction in Novosibirsk region.

**Keywords:** fast processes, detonation processes, coordinate detectors, time-resolved detectors, electronic registration channel, microstrip silicon detector, specialized integrated circuit, synchrotron radiation.