

УДК 539.1.074

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ НА ПУЧКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2019 г. Л. И. Шехтман<sup>1,2, \*</sup>, В. М. Аульченко<sup>1,2</sup>, В. В. Жуланов<sup>1,2</sup>, Д. В. Кудашкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

\*E-mail: l.i.shekhtman@inp.nsk.su

Описано текущее состояние работ по модернизации детектора для изучения быстропротекающих процессов на пучке синхротронного излучения (СИ), DIMEX. Для существенного улучшения параметров было принято решение перейти на технологию кремниевого микрополоскового детектора. Был изготовлен прототип на основе микро-полоскового кремниевого сенсора и специальная микросхема для считывания сигналов с него. Первые испытания прототипа DIMEX-Si на пучке СИ показали, что новый детектор существенно превосходит газовую версию детектора по всем параметрам. Приводятся результаты первых испытаний прототипа кремниевого микрополоскового детектора на пучке СИ ВЭПП-4М.

DOI: 10.1134/S036767651902025X

### ВВЕДЕНИЕ

Детектор для изучения быстропротекающих процессов на пучке синхротронного излучения (СИ), DIMEX (Detector for Imaging of Explosions), работает на канале № 0 на накопителе ВЭПП-3 более 15 лет (с 2003 г.), а на канале № 8 на накопителе ВЭПП-4М 4 г. [1–8]. Первая версия детектора DIMEX, так долго и успешно работающая на накопителе ВЭПП-3, представляет собой однокоординатную ионизационную камеру высокого давления с регистрацией быстрой электронной компоненты ионизации. При этом медленная ионная компонента экранирована от считывающей полосковой структуры с помощью газового электронного множителя (ГЭУ, GEM) [9, 10], представляющего собой сетку из полиимида (каптона) толщиной 50 мкм с двусторонним меднением (слои меди толщиной 5 мкм) и регулярной структурой из сквозных отверстий диаметром ~70 мкм и шагом 140 мкм. Детектор заполнен газовой смесью Xe + 25%CO<sub>2</sub> под абсолютным давлением 7 атм. Считывающая структура детектора состоит из 512 полосок длиной 30 мм, направленных вдоль пучка и расположенных с шагом 100 мкм. Каждая полоска присоединена к входу интегратора, выход которого подключается к ячейкам аналоговой памяти. В первой версии детектора в каждом канале имелось 32 ячейки памяти, в которые по очереди записывался сигнал, поступающий на полосу считывающей структуры. Запись сигнала велась синхронно с пролетом сгустков электро-

нов в накопителе. Конфигурация электроники, в которой аналоговый сигнал с детектора быстро записывается в память внутри интегральной схемы, присоединенной к считывающей структуре, а по окончании эксперимента оцифровывается и вычитывается в компьютер, позволяет реализовывать сверхбыструю регистрацию изучаемого процесса. Так, в первой версии детектора DIMEX скорость записи составляла 2 млн кадров в секунду.

Ограничение по скорости записи и по количеству записываемых кадров в первой версии детектора определялось используемой интегральной схемой (ИС) APC128 [11]. Для улучшения этих параметров была разработана новая ИС DMXG64 [12, 13], которая позволила одновременно увеличить скорость записи до 8 миллионов кадров в секунду и число ячеек памяти в каждом канале (число кадров) до 100.

Запуск канала СИ № 8 на накопителе ВЭПП-4М с новым 9-полюсным вигглером с полем 2 Тл открыл новые возможности для проведения экспериментов по изучению быстропротекающих процессов (рис. 1) [14]. На рис. 2 приведено сравнение спектров излучения на входе в детектор на станции “Детонация” на канале № 0 ВЭПП-3 и на станции “Детонация-2” на канале № 8 ВЭПП-4М. Так, интегральный поток излучения в области новой станции “Детонация-2” составляет около 10<sup>7</sup> фотонов/мм<sup>2</sup>сгусток, что, в принципе, позволяет снизить погрешность измерения плотности объекта до 0.1%. Однако при таких потоках, превыша-



Рис. 1. Внешний вид канала СИ № 8 на накопителе ВЭПП-4М и станции “Детонация-2”.

ющих загрузки на ВЭПП-3 более, чем в 100 раз, газовый детектор работать не может [15]. Основная проблема газового детектора – накопление медленных положительных ионов в чувствительном объеме при большой загрузке и, как следствие, экранировка электрического поля и прекращение дрейфа электронов. Для устранения этой проблемы было принято решение перейти на твердотельную технологию и разработать детектор, основанный на кремниевом микрополосковом сенсоре [16]. Прототип такого детектора был разработан, и в настоящей работе приводятся первые результаты сравнения основных характеристик кремниевого и газового детекторов.

## 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА DIMEX

Основные характеристики газового детектора DIMEX-G, такие как DQE (detective quantum efficiency или квантовая эффективность обнаружения), пространственное разрешение и временное разрешение были измерены на пучке СИ на канале 0 ВЭПП-3. Спектр излучения перед детектором на станции “Детонация” показан на рис. 2. Для измерения DQE детектор облучался однородным пучком СИ. Поток излучения изменялся с помощью поглотителей из плексигласа, либо при помощи изменения высоты коллиматора, формирующего тонкий горизонтальный пучок. После набора большого количества кадров (более 1000) проводилась процедура коррекции постоянной неоднородности каналов детектора, а также фильтрация коррелированных шумов, – изме-

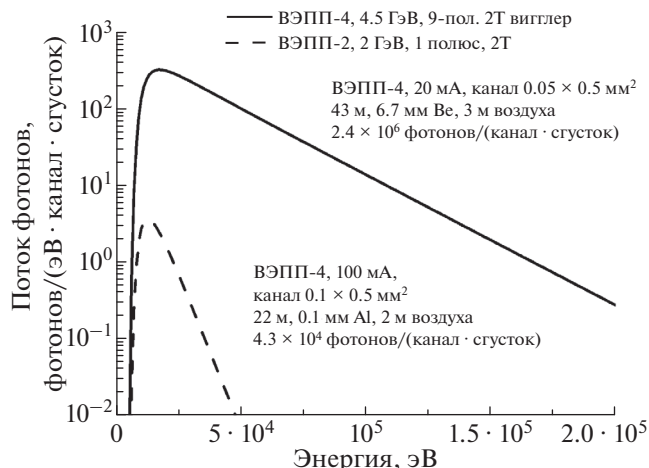


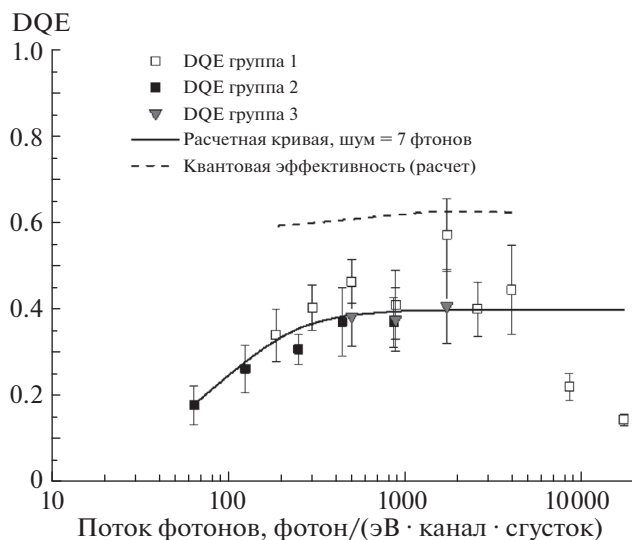
Рис. 2. Спектры излучения перед детектором на станциях “Детонация” на ВЭПП-3 и “Детонация-2” на ВЭПП-4М.

нения сигнала во всех каналах или в большой группе каналов (более 20 каналов). Далее вычислялось среднее значение сигнала, среднеквадратичная неоднородность сигнала в каналах, а также автокорреляционная функция. По форме автокорреляционной функции рассчитывалась длина корреляции, – среднее число каналов, срабатывающих от одного фотона. DQE вычислялась по формуле

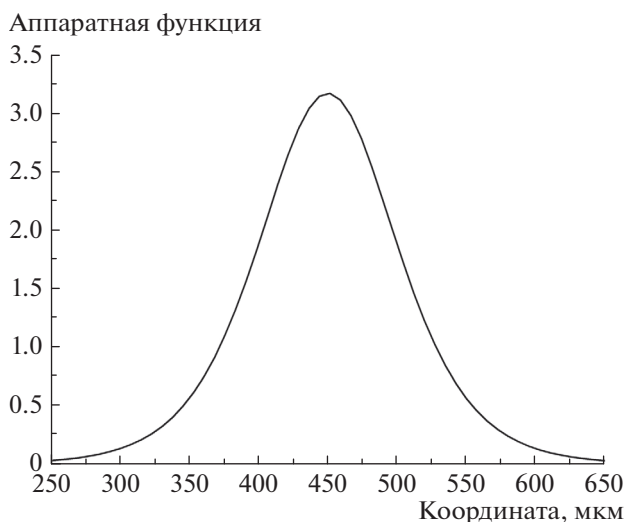
$$DQE = (N_{av}/rms)^2 / (N_{in}L_{corr}), \quad (1)$$

где  $rms$  – среднеквадратичное отклонение,  $N_{av}$  – среднее значение сигнала,  $N_{in}$  – падающий поток в канал детектора и  $L_{corr}$  – длина корреляции [4]. Зависимость DQE от падающего потока показана на рис. 3. На рисунке точками показаны результаты для нескольких групп измерений. Видно, что с точностью до статистических ошибок все измерения совпадают друг с другом. Кроме того, на графике проведена теоретическая кривая зависимости DQE от падающего потока с учетом шума электроники 7 фотонов, а также расчетная кривая квантовой эффективности с учетом различной толщины поглотителя из плексигласа.

Расчетная квантовая эффективность (доля потока, поглощенная в чувствительном объеме детектора) значительно превышает DQE, поскольку величина последней определяется, в частности, флуктуациями сигнала, в том числе шумом электроники и флуктуациями энерговыделения. Падение DQE при больших потоках связано с накапливающимся в чувствительном объеме зарядом положительных ионов, который экранирует внешнее электрическое поле. Видно, что линейный участок работы детектора ограничен входным потоком  $\sim 5000$  фотонов/(канал · сгусток), а значение DQE равно примерно 40%.



**Рис. 3.** DQE газового детектора DIMEX в зависимости от входного потока. Точками обозначены результаты измерений со статистическими ошибками. Сплошная кривая – теоретическая кривая при значении шума 7 фотонов и значении DQE при большом потоке 40%. Штрихами обозначена расчетная квантовая эффективность в том случае, когда входной поток изменялся с помощью поглотителей из плексилгласа.

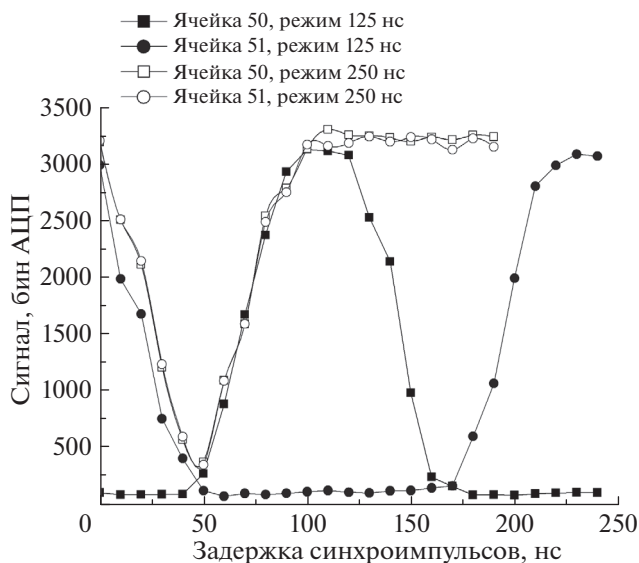


**Рис. 4.** Аппаратная функция газового детектора DIMEX. ШПВ равна ~240 мкм.

Пространственное разрешение детектора измерялось методом непрозрачного края. При этом вплотную к детектору был укреплен “нож” из стали толщиной 4 мм, который перегораживал пучок в направлении, перпендикулярном его плоскости. Перед измерением пространственного разрешения детектор был отъюстирован так, чтобы направление полосок считывающей структуры совпало с направлением пучка СИ. После проведения измерения результирующая зависимость подгонялась гладкой функцией. Производная от этой функции является изображением тонкого пучка – аппаратной функцией, а ее ширина на полувысоте (ШПВ), величиной, характеризующей разрешение. Аппаратная функция детектора приведена на рис. 4.

Поскольку с помощью детектора DIMEX изучаются быстропротекающие процессы, важной характеристикой является временное разрешение. Временное разрешение газового детектора измерялось на накопителе ВЭПП-3. Для этого накопитель работал в одно-сгустковом режиме. При этом время между пролетом двух последовательных сгустков равно 250 нс. Детектор включался в режим работы с периодом измерения 125 нс. Проводилось измерение зависимости сигнала в детекторе от времени между моментом пролета сгустка в накопителе и моментом запуска измерения. Результат этого измерения для одного канала и двух ячеек аналоговой памяти приведен на рис. 5. На

рисунке видно, что для ячейки № 50 (черные сплошные квадраты) есть диапазон временных задержек в районе 100 нс величиной около 20 нс, когда сигнал принимает максимальные значения. При увеличении задержки между пролетом сгустка и запуском измерения сигнал появляется в следующей ячейке № 51, которая соответствует следующему кадру. Величина сигнала в максиму-



**Рис. 5.** Зависимость сигнала в двух ячейках аналоговой памяти одного канала газового детектора от времени между пролетом сгустка в накопителе и моментом запуска измерения в детекторе. Приведены результаты для двух режимов работы – с периодом измерений 125 и 250 нс. Время между пролетом сгустков – 250 нс.

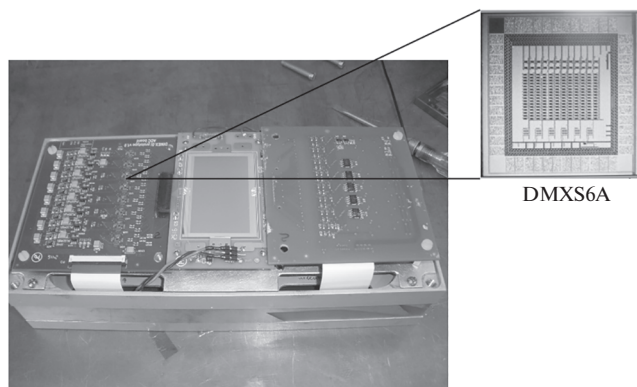


Рис. 6. Внешний вид прототипа DIMEX-Si на 96 каналов. Топология ИС DMXS6A показана в увеличенном виде.

ме с точностью до статистических ошибок одинакова в режиме с периодом измерений 125 и 250 нс, это означает, что при задержке запуска измерения 100 нс сигнал полностью регистрируется входным интегратором. Ширина переходной части кривой от нулевого сигнала к полному сигналу определяется временной характеристикой интегратора, а также транспортом электронов через газовый промежуток детектора (скоростью дрейфа и продольной диффузией). Фактически, ширина этого склона и является временным разрешением детектора. Из рисунка видно, что эта величина примерно равна 50 нс.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРОТОТИПОМ КРЕМНИЕВОГО ДЕТЕКТОРА DIMEX-SI

На основе кремниевого микрополоскового сенсора производства Хамаматсу-Фотоникс с резисторами  $\sim 300$  Ом между металлическими полосками и охранным кольцом, присоединенным к отрицательному полюсу источника смещения [16], был создан прототип кремниевого детектора DIMEX-Si [15]. Прототип состоит из кремниевого сенсора типа *p-in-n* толщиной 320 мкм с полосками длиной 30 мм и шагом 50 мкм. К электронике присоединено 96 полосок в центре (рис. 6).

Электроника регистрации прототипа основана на специализированной ИС DMXS6A, разработанной в ИЯФ СО РАН [15, 16]. Каждый чип содержит 6 каналов, в которых имеется преобразователь напряжения в ток, схема стабилизации уровня, четыре подключаемых интегратора с восемью подключаемыми ячейками аналоговой памяти каждый. Микросхема позволяет измерять напряжение на полосках сенсора каждые 20 нс с высокой точностью и записывать эту величину в аналоговую память. Таким образом, прототип

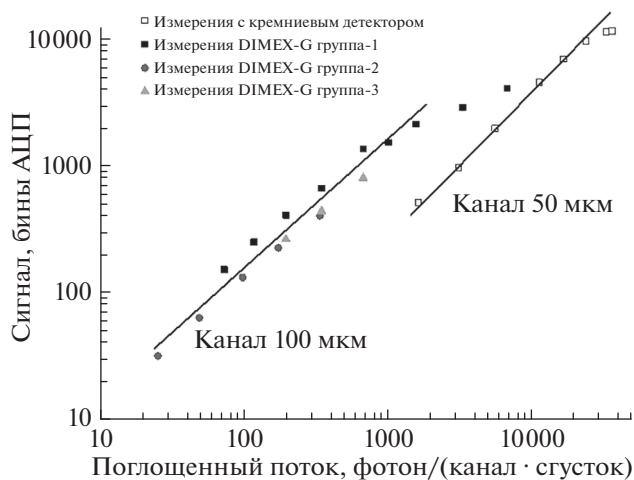


Рис. 7. Зависимость сигнала в детекторе от поглощенного потока СИ. Сравнение DIMEX-G и прототипа DIMEX-Si.

DIMEX-Si позволяет измерять пространственное распределение сигнала с шагом 50 мкм, а изменение во времени с дискретностью 20 нс.

Прототип DIMEX-Si был установлен на станции “Детонация-2”, где были измерены его основные характеристики. При этом сенсор был расположен перпендикулярно направлению пучка, а не под малым углом, как планируется для полноформатного детектора [15, 16]. Зависимость сигнала в детекторе от зарегистрированного потока показана на рис. 7. Видно, что ограничение сигнала в кремниевом детекторе наступает при значении зарегистрированного потока около 20000 фотонов/(канал · сгусток), тогда как в DIMEX-G это значение: равно  $\sim 1200$  фотонов/(канал · сгусток). Здесь следует отметить, что на рис. 3 горизонтальная шкала представлена в единицах падающего потока, тогда как на рис. 7 в единицах зарегистрированного потока (падающий поток  $\times 0.4$  для DIMEX-G). Кроме того, если в газовом детекторе сигнал ограничивался объемным зарядом, который приводил к сложной картине деградации сигнала (на краях апертуры сигнал падал медленнее, чем в центре), то в кремниевом детекторе ограничение связано с насыщением сигнала в интеграторах. Таким образом, в кремниевом детекторе возможно дальнейшее увеличение предельного регистрируемого сигнала путем деления входного сигнала на встроенном резистивном делителе.

Пространственное разрешение кремниевого детектора измерялось по той же методике, как и DIMEX-G. Результат измерения аппаратной функции кремниевого детектора в сравнении с DIMEX-G приведен на рис. 8. Ширина на полу-

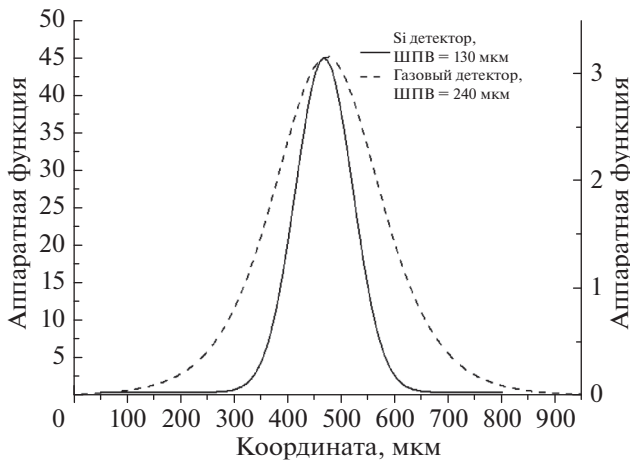


Рис. 8. Сравнение аппаратных функций газового детектора (левая шкала) и кремниевого детектора (правая шкала).

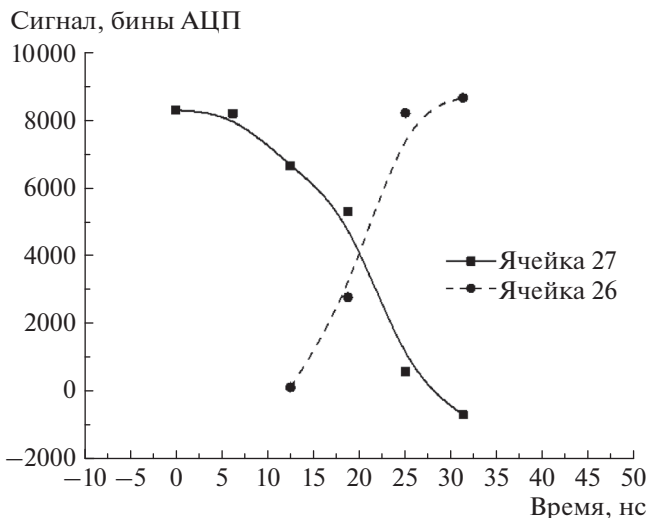


Рис. 9. Результат измерения зависимости сигнала в одном канале и двух последовательных ячейках кремниевого детектора от времени между пролетом сгустка и началом измерения.

высоте аппаратной функции кремниевого детектора равна 130 мкм, что почти в два раза лучше, чем у газового детектора. Для измерения временного разрешения была измерена зависимость сигнала от времени между пролетом сгустка и началом измерения в детекторе (рис. 9). Ширина переходной области между соседними ячейками, которая характеризует предельную (минимальную) длительность цикла измерения, достигаемую в этом детекторе, равна примерно 15 нс. Это время более чем в три раза лучше, чем в газовом детекторе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения, проведенные на первом прототипе кремниевого детектора для изучения быстропротекающих процессов DIMEX-Si, показали, что этот детектор по всем параметрам значительно превосходит газовый детектор. Максимальный поток СИ, который может быть измерен кремниевым детектором, больше в  $\sim 20$  раз, пространственное разрешение лучше в  $\sim 2$  раза и временное разрешение лучше в  $\sim 3$  раза. В дальнейшем предполагается увеличить максимальный регистрируемый поток СИ за счет соответствующего изменения резистивного делителя на входе электроники регистрации и понизить шум канала регистрации, чтобы добиться увеличения динамического диапазона до  $10^3$ .

Настоящая работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «СЦСТИ» на базе ВЭПП-3/ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 19.
2. Aulchenko V., Ponomarev S., Shekhtman L. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. A 513. P. 388.
3. Aulchenko A., Zhulanov V., Shekhtman L. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. A543. P. 350.
4. Aulchenko V.M., Evdokov O.V., Shekhtman L.I. et al. // J. of Instr. 2008. V. 3. P. 05005.
5. Aulchenko V.M., Evdokov O.V., Shekhtman L.I. et al. // Nucl. Instrum. and Methods, 2009 V. 603. P. 73.
6. Аульченко В.М., Евдоков О.В., Жогин И.Л. и др. // ПТЭ. 2010. № 2. С. 1.
7. Aulchenko V.M., Baru S.E., Evdokov O.V. et al. // Nucl. Instrum. and Methods, 2010. V. A623. P. 600.
8. E. A. Babichev, S. E. Baru, D. N. Grigoriev, et al. // Nucl. Instrum. and Methods, 2011. V. 628. P. 440.
9. Sauli F. // Nucl. Instrum. and Methods, 1997. V. A386. P. 531.
10. Sauli F. // Nucl. Instrum. and Methods, 2016. 805 С. 2.
11. Horisberger R., Pitzl D. // Nucl. Instrum. and Methods, 1993. V. A 326. P. 92.
12. Aulchenko, V., Shekhtman, L., Zhulanov, V. // J. of Instr. 2015. V. 10. P. 09013.
13. Aulchenko V., Shekhtman L., Zhulanov V. // J. of Instr. 2017. V. 12. P. 05004.
14. Tolochko B.P., Kosov A.V., Evdokov O.V. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 427.
15. Shekhtman L.I., Aulchenko V.M., Kudryavtsev V.N. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 189.
16. Aulchenko V., Prueel E., Shekhtman L. et al. // Nucl. Instrum. and Methods, 2017. V. A845. P. 169.