

## ПУЧКОВЫЙ ТРЕКЕР И ПРОФИЛОМЕТР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ВМ@N

*Ю. А. Топко*\*, *С. В. Хабаров*\*\* , *Н. И. Замятин*\*\*\* ,  
*Б. Л. Топко*, *О. Г. Тарасов*, *Е. В. Зубарев*, *Ю. А. Копылов*,  
*Е. А. Стрелецкая*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В эксперименте с фиксированной мишенью ВМ@N при настройке выведенного из ускорителя нуклотрона ионного пучка применяется пучковый профилометр, а для определения плоскости реакции — трекер. Профилометр и трекер состоят из координатных плоскостей на основе тонких (175 мкм) двусторонних стриповых кремниевых детекторов, расположенных перед мишенью внутри вакуумной пучковой трубы. Физическая программа эксперимента ВМ@N включает использование широкого спектра ускоренных ионов (от углерода до золота с энергией до 4 ГэВ/нуклон). Для регистрации сигналов в большом динамическом диапазоне выбраны два варианта детекторной электроники: для легких ионов — с большим усилением, для тяжелых ионов — с низким усилением. Представлены конструкция и основные параметры профилометра и трекера.

The ВМ@N is the fixed target experiment for studies of baryonic matter at the Nuclotron (Joint Institute for Nuclear Research, Dubna). According to the upgrade plans for the ВМ@N, a vacuum beam pipe will be added into the experimental setup. To determine the coordinates of an incident “trigger ion” and to tune the beam, it is necessary to develop three coordinate stations of the beam tracker and two coordinate stations of the beam profilometer, respectively. Each station of the beam tracker or the beam profilometer will be based on the Double-sided Silicon Strip Detector with 175  $\mu\text{m}$  thickness and will have the following number of strips: 128  $\times$  128 is for the tracker and 32  $\times$  32 — profilometer. The front-end electronics for these silicon detectors are based on the multichannel IDEAS (Integrated Detector Electronics AS, Norway) Application Specific-Integrated Curcuits. Overview of the developing system is presented.

PACS: 29.40.Gx; 29.40.Wk; 41.85.Ew

---

\* E-mail: avinovayu@gmail.com

\*\* E-mail: sergei.khabarov@mail.ru

\*\*\* E-mail: nzamiatin@mail.ru

## ВВЕДЕНИЕ

BM@N — первый эксперимент ускорительного комплекса NICA, строящегося на базе Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Для проведения настройки и определения размеров выведенного из нуклотрона ионного пучка разрабатываются две плоскости пучкового профилометра, для определения плоскости реакции по направлению и углу падения триггерного иона на мишень ведется разработка трех двухкоординатных плоскостей пучкового трекера.

### 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ (ПОГЛОЩЕННОЙ) ЭНЕРГИИ ИОНИЗАЦИИ В 175-МКМ КРЕМНИИ

Пучковые детекторы будут состоять из двухкоординатных плоскостей на основе тонких (175 мкм) стриповых кремниевых детекторов (Double-sided Silicon Strip Detector, DSSD), разработанных и изготовленных НИИ материаловедения (Зеленоград). Толщина кремниевых детекторов 175 мкм выбрана для уменьшения количества вещества на пути пучка и снижения эффекта радиационных повреждений из-за роста объемного темнового тока, который является источником шума в детекторе. Согласно физической программе эксперимента BM@N будут выводиться пучки ионов с разным значением  $Z$  (от  ${}^6\text{C}$  до  ${}^{79}\text{Au}$ ). Расчеты ионизационных потерь энергии для разных типов ионов (4 ГэВ/нуклон) в кремнии толщиной 175 мкм были выполнены с помощью Geant4 для оценки диапазона сигналов детектора. Результаты данного моделирования представлены на рис. 1.

Сигнал ионизации кремниевого детектора толщиной 175 мкм для «легких» ионов ( ${}^6\text{C}$ – ${}_{18}\text{Ar}$ ) находится в диапазоне от 96 до 866 фКл, для «тяжелых» ионов ( ${}_{36}\text{Kг}$ – ${}_{79}\text{Au}$ ) — от 4 до 18 пКл. Таким образом был определен динамический диапазон сигналов при выборе типа специализированных интегральных схем (ИС) для регистрирующей электроники пучковых детекторов. Другими требованиями являются: короткое время формирования ( $< 3 \cdot 10^{-7}$  с) для исключения наложений сигналов, не менее 32 измерительных каналов в чипе, измерение амплитуды по сигналу внешнего триггера для пучкового трекера или по сигналу внутреннего триггера (self-trigger) для пучкового профилометра. Для измерений амплитуд сигналов детектора в большом динамическом диапазоне будут применяться два варианта детекторной электроники — для «легких» и «тяжелых» ионов. Исходя из перечисленных выше требований были выбраны следующие коммерчески доступные ИС-компании IDEAS (Норвегия): для легких ионов — VA163, для тяжелых — VA32HDR11 (пучковый профилометр), VATA64HDR16.2 (пучковый трекер). Характеристики ИС приведены в табл. 1 и 2.

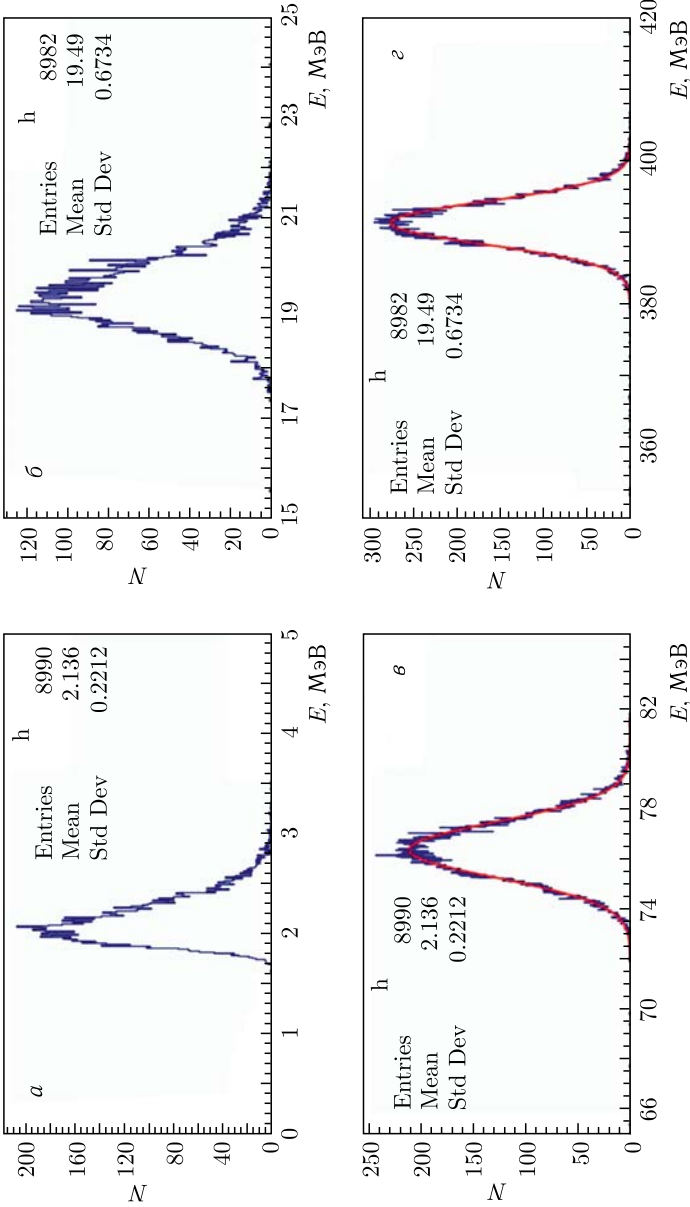


Рис. 1. Моделирование ионизационных потерь в 175-мкм кремнии для разных типов ионов с энергией 4 ГэВ/нуклон: а) углерод; б) аргон; в) криптон; г) золото

## 2. ОЦЕНКА РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПУЧКОВОГО ТРЕКЕРА

Пучковый трекер, расположенный внутри вакуумной трубы, позволит установить направление и угол падения триггерного иона для дальнейшего определения плоскости реакции методом измерения азимутального направления суммарной энергии, выделенной в калориметре. Важным параметром пучкового трекера при работе в высоких радиационных полях является оценка ресурса работоспособности кремниевых детекторов из-за радиационных повреждений. Для этой оценки с помощью библиотеки SR-NIEL для Geant4 [1] были рассчитаны неионизационные потери энергии (NIEL) в кремнии для ионов золота (максимальный эффект радиационных повреждений) с энергией 4 ГэВ/нуклон, которые составили  $0,96 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$  (рис. 2), что в 470 раз больше неионизационных потерь от 1 МэВ нейтрона ( $\text{NIEL}_{n, 1 \text{ МэВ}} = 0,00204 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$  [2]).

Для оценки роста темнового тока после облучения ионами золота в течение 2 мес ( $5,18 \cdot 10^6 \text{ с}$ ) в условиях эксперимента VM@N: диаметр пучка равен 3 см ( $\sim 64$  стрипа с каждой стороны детектора в зоне пучка), интенсивность ионов  $10^6 \text{ с}^{-1}$ . Эквивалентный флюенс нейтронов с энергией 1 МэВ (Si) рассчитан по формуле

$$\begin{aligned} \Phi_{1 \text{ МэВ}} &= \frac{\text{NIEL}_{\text{Au}}(4 \text{ ГэВ/нуклон})}{\text{NIEL}_{n, 1 \text{ МэВ}}} \Phi_{\text{Au}} = \\ &= \frac{\text{NIEL}_{\text{Au}}(4 \text{ ГэВ/нуклон})}{\text{NIEL}_{n, 1 \text{ МэВ}}} \frac{4Ft}{\pi d^2} \approx 3,45 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}, \quad (1) \end{aligned}$$

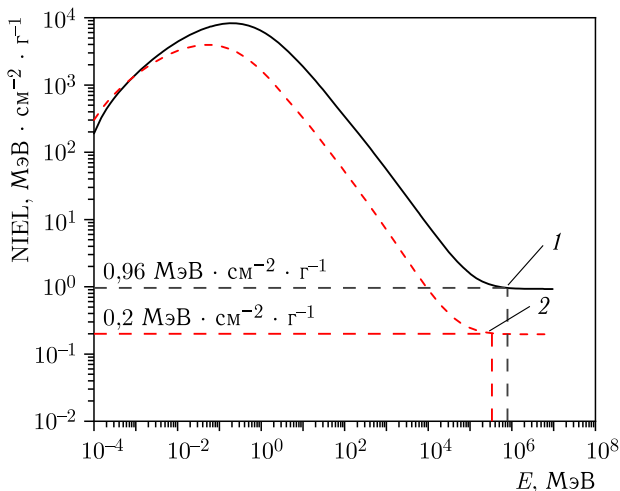


Рис. 2. Результаты моделирования SR-NIEL в кремниевом детекторе для ионов  $\text{Au}^{79+}$  (1) и  $\text{K}^{36+}$  (2) с энергией 4 ГэВ/нуклон

где  $\Phi_{1 \text{ МэВ}}$  — эквивалентный флюенс нейтронов с энергией 1 МэВ;  $\text{NIEL}_{\text{Au}}(4 \text{ ГэВ/нуклон})$  — неионизационные потери иона золота энергии 4 ГэВ/нуклон в кремнии;  $\Phi_{\text{Au}} = 4Ft/\pi d^2$ ,  $\text{см}^{-2}$  — флюенс ионов золота;  $F$  — интенсивность пучка,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  — время облучения, с;  $d$  — диаметр пучка, см.

Рост темнового тока кремниевого детектора из-за радиационных повреждений без учета самоотжига при температуре  $+20^\circ\text{C}$  рассчитывается по эмпирической формуле:

$$\Delta I = \alpha V \Phi_{1 \text{ МэВ}} = 2,13 \text{ мА}, \quad (2)$$

где  $\alpha = 5 \cdot 10^{-17} \text{ А} \cdot \text{см}^{-1}$  — токовая константа радиационных повреждений кремния нейтронами с энергией 1 МэВ [3];  $V = S_{\text{beam}} h_{\text{detector}}$  — объем детектора, повреждаемый пучком;  $S_{\text{beam}}$  — площадь пучка,  $\text{см}^2$ ;  $h_{\text{detector}}$  — толщина кремниевого детектора, см.

Таким образом максимальное увеличение объемного темнового тока одного стрипа из-за радиационных повреждений кремниевого детектора в зоне пучка будет равно 35 мкА. С учетом величины сигнала ионизации от одного иона золота, прошедшего через один стрип кремниевого детектора (0,9 мА при величине заряда ионизации 18 пКл и времени сбора заряда 20 нс), соотношение сигнал/шум будет значительно больше 1, т. е. детектор будет оставаться работоспособным.

### 3. ПУЧКОВЫЙ ТРЕКЕР

Пучковый трекер состоит из трех координатных плоскостей на основе двусторонних кремниевых детекторов, расположенных внутри пучковой трубы на расстоянии 0,5 м от мишени и с интервалом 1 м между каждой плоскостью.

**3.1. Характеристики двустороннего стрипового кремниевого детектора для пучкового трекера.** Двусторонние стриповые кремниевые детекторы для пучкового трекера изготовлены на основе планарной технологии тонких (175 мкм) четырехдюймовых пластин бестигельной зонной плавки (БЗП)  $n$ -типа проводимости. Чувствительная область детектора  $61 \times 61$  мм, достаточная для полного перекрытия пучка диаметром 3 см. Количество стрипов на каждой стороне — 128, угол между стрипами  $p^+/n^+$  равен  $90^\circ$ .

**3.2. Параметры электроники регистрации сигналов пучкового трекера.** Характеристики специализированных ИС для двух версий детекторной электроники пучкового трекера приведены в табл. 1 [4, 5].

Координатная плоскость пучкового трекера расположена внутри вакуумной станции, печатные платы детекторной электроники установлены на внешней стороне вакуумного фланца и не подвергаются радиационным повреждениям ионами пучка.

Количество регистрирующих каналов детектора пучкового трекера составляет 256 (128  $p^+/128 n^+$  стрипов детектора). Детекторная элек-

Таблица 1. Характеристики ИС детекторной электроники пучкового трека

Тип ионов	Заряд ионизации	Название ИС	Количество каналов	Динамический диапазон, пКл	Время формирования, нс
${}^6\text{C}-{}_{18}\text{Ar}$	96–866 фКл	VATA64HDR16.2	64	–20 – +55	50/100/150/300
${}_{36}\text{Kг}-{}_{79}\text{Ar}$	4–18 пКл	VATA64HDR16.2	64	–20 – +55	50/100/150/300

Троника состоит из четырех 64-канальных плат. На каждой из четырех плат установлена мезонинная плата, на которой смонтирована, разварена и герметизирована компаундом микросхема VATA64HDR16.2.

Считывающая электроника пучкового трека запускается по внешнему сигналу «триггер» и включена в систему сбора данных и хранения эксперимента VM@N.

#### 4. ПУЧКОВЫЙ ПРОФИЛОМЕТР

Для настройки выведенного из ускорителя (нуклотрона) ионного пучка разрабатываются две плоскости пучкового профилометра на основе двусторонних кремниевых детекторов, расположенных внутри пучковой трубы. Первая и вторая плоскости расположены от мишени на расстоянии 0,4 и 3,5 м соответственно.

**4.1. Характеристики двустороннего стрипового кремниевого детектора для пучкового профилометра.** Двусторонние стриповые кремниевые детекторы для пучкового профилометра изготовлены на основе планарной технологии четырехдюймовых пластин БЗП  $n$ -типа проводимости. Толщина детектора — 175 мкм, чувствительная область —  $58 \times 58$  мм, 32 стрипа  $p^+$ -стороны ортогональны 32 стрипам  $n^+$ -стороны.

**4.2. Параметры электроники регистрации сигналов пучкового профилометра.** Характеристики специализированных ИС для двух версий детекторной электроники пучкового профилометра приведены в табл. 2 [6, 7].

Координатные плоскости профилометра расположены внутри пучковой трубы для измерения положения и размеров пучка. Механическая конструкция профилометра позволяет автоматически убирать координатные плоскости из зоны пучка после настройки. Электроника регистрации сигналов профилометра работает в автономном режиме (без подключения к общей системе сбора и хранения данных эксперимента) с возможностью передачи данных по Ethernet для визуализации и хранения информации о параметрах пучка. Автономный режим обеспечивается возможностью формирования собственного внутреннего триггера. Для этой задачи применяются специализированные микросхемы TA32cg2 компа-

Таблица 2. Характеристики ИС детекторной электроники пучкового профилометра

Тип ионов	Заряд ионизации	Название ИС	Количество каналов	Динамический диапазон	Время формирования, нс
${}^6\text{C}-{}_{18}\text{Ar}$	96–866 фКл	VA163 + TA32cg2	32	$\pm 750$ фКл	500
${}^{36}\text{Kr}-{}_{79}\text{Ar}$	4–18 пКл	VA32HDR11 + TA32cg2	32	–35 пКл – +25 пКл	900

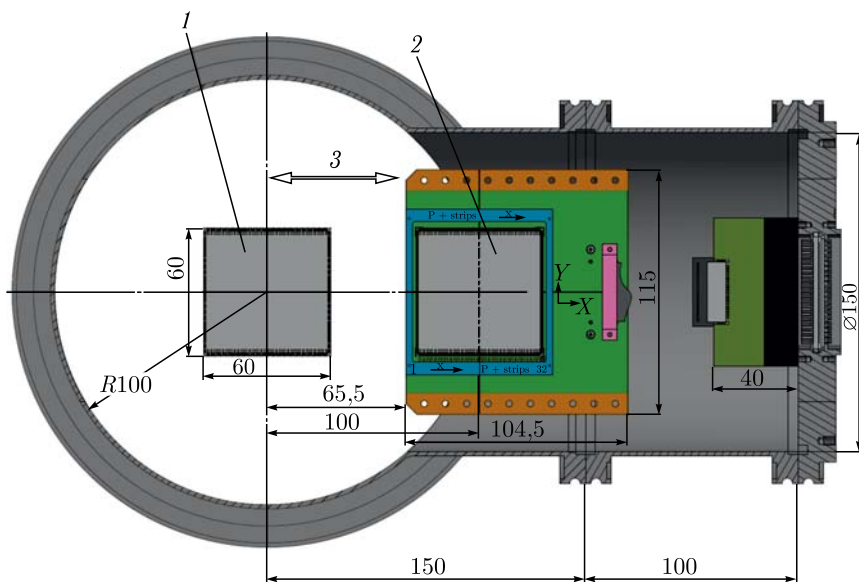


Рис. 3. Конструкция координатной плоскости пучкового профилометра внутри вакуумной станции: 1 — детектор в рабочем положении; 2 — детектор в убранном положении; 3 — направление движения 100 мм

нии IDEAS. Таким образом, на печатную мезонинную плату развариваются две ИС: для выработки триггера и сбора сигналов с детектора. Две 32-канальные платы электроники считывания профилометра установлены на внешней стороне вакуумного фланца. Внешний вид конструкции профилометра внутри вакуумной станции представлен на рис. 3.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны две координатные плоскости ( $32X \times 32Y$ ) профилометра и три координатные плоскости ( $128X \times 128Y$ ) пучкового трека на основе тонких (175 мкм) двусторонних кремниевых детекторов. Проведена

оценка эффектов радиационных повреждений кремниевых детекторов в условиях эксперимента VM@N при облучении ядрами золота с энергией 4 ГэВ/нуклон, интенсивностью ионов  $10^6 \text{ с}^{-1}$ . Рост темнового тока из-за радиационных повреждений кремниевого детектора в течение сеанса длительностью 2 мес не приведет к потерям эффективности регистрации пучковых ионов.

По результатам расчетов приведены значения сигналов ионизации для четырех типов ионов ( ${}^6\text{C}$ ,  ${}^{18}\text{Ar}$ ,  ${}^{36}\text{Kr}$ ,  ${}^{79}\text{Au}$ ) с энергией 4 ГэВ/нуклон в диапазоне от 96 фКл ( ${}^6\text{C}$ ) до 18 пКл ( ${}^{79}\text{Au}$ ). Для данного диапазона сигналов выбраны два типа коммерчески доступных специализированных бескорпусных схем компании IDEAS: для легких ионов — VA163, для тяжелых — VATA64HDR16.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boschini M. J., Rancoita P. G., Tacconi M.* SR-NIEL Calculator: Screened Relativistic (SR) Treatment for Calculating the Displacement Damage and Nuclear Stopping Powers for Electrons, Protons, Light- and Heavy-Ions in Materials (version 6.9.0) (2014). (Online) available at INFN sez., Milano-Bicocca, Italy, Dec. 2019; <http://www.sr-niel.org/>.
2. ASTM E722-09, Standard Practice for Characterizing Neutron Fluence Spectra in Terms of an Equivalent Monoenergetic Neutron Fluence for Radiation-Hardness Testing of Electronics. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2009; [www.astm.org](http://www.astm.org).
3. *Moll M.* Radiation Damage in Silicon Particle Detectors. Dissertation. 1999. P. 259.
4. VA163 32 CSAs with Pre-amplifier Outputs, Sample-and-Hold Multiplexer Output. Integrated Detector Electronics AS Datasheet. 2013. P. 19.
5. VATA64HDR16.2. Integrated Detector Electronics AS Datasheet. 15.10.2018. P. 29.
6. VA32HDR11. Integrated Detector Electronics AS Datasheet. 20.10.2000. P. 11.
7. TA32cg2. Integrated Detector Electronics AS Datasheet. 12.02.2002. P. 13.