

С. Н. ТЕРЕХИН, А. А. ВАСИЛЬЕВ, М. Е. ВЗНУЗДАЕВ, Л. М. КОЧЕНДА, И. Ю. ИВАНОВ,
С. С. КИСЕЛЕВ, М. Я. МАРУСИНА, П. А. КРАВЦОВ, А. В. НАДТОЧИЙ, В. А. ТРОФИМОВ

ПРИБОРНАЯ БАЗА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ DD-ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ В ПРОЕКТЕ POLFUSION

Разработан и исследован прототип электронно-механической детекторной системы для эксперимента по исследованию сечения реакции dd -ядерного синтеза с поляризованными компонентами.

Ключевые слова: поляризованные атомы, сечение реакции, ядерный синтез.

Реакции ядерного синтеза $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$, $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$, $d + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$ в плазме при энергии от нескольких килоэлектрон-вольт до 100 кэВ играют ключевую роль в астрофизических процессах, они могут найти применение в практической ядерной энергетике будущего. Известны экспериментальные данные, главным образом, для этих реакций с неполяризованными сталкивающимися ядрами [1, 2]. Между тем эффекты поляризации могут оказывать существенное влияние на величину сечения реакций, изменение которой даже на несколько процентов может привести к значительным изменениям параметров будущих термоядерных реакторов. Теоретические вычисления сечения в этом случае чрезвычайно усложнены, и точность таких вычислений нельзя гарантировать [3]. Только экспериментальное измерение этих сечений может дать необходимую информацию с приемлемой точностью. Для изучения астрофизических и технических аспектов реакций ядерного синтеза очень важно измерить сечения реакций для случая двух поляризованных начальных ядер. Полученные результаты позволят рассматривать возможность применения реакции при низких температурах. При использовании поляризованных первичных частиц сечение реакции может существенно увеличиться.

Общая схема эксперимента приведена на рис. 1.

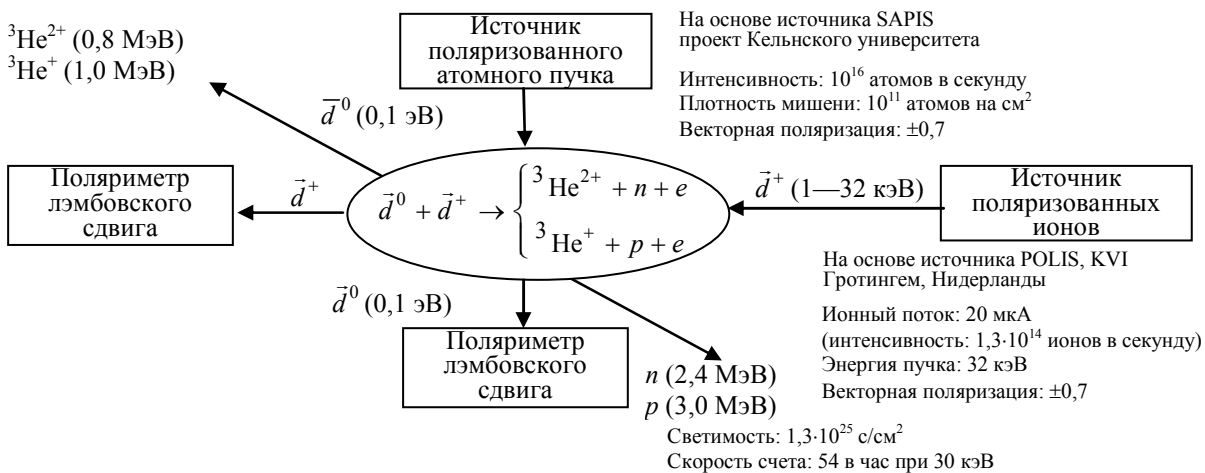


Рис. 1

В состав экспериментальной установки входят два поляризованных источника. Источник поляризованных атомов используется для создания газовой мишени. Поляризованный ионный источник создает пучок поляризованных ионов дейтерия с энергией от 1 до 30 кэВ. Для измерения степени поляризации каждого источника применяются поляриметры лэмбов-

ского сдвига. В центре находится детекторная камера, в которой протекает реакция и детектируются продукты синтеза.

ABS — источник поляризованных атомов. Конструкция и описание источника поляризованных атомов приведены на рис. 2.

Для создания водородного или дейтериевого атомарного пучка используется радиочастотный диссоциатор. Радиочастотная мощность подается в параллельный LC-контур от генератора с частотой 13,56 МГц. Охлаждение разрядной трубки обеспечивается потоком смеси спирта и воды между двумя внешними коаксиальными трубками большего диаметра. Для стабилизации температуры сопла в диапазоне 40—100 К применен криогенератор, соединенный с соплом посредством гибкого медного теплового моста. Верхняя вакуумная камера разделена двумя подвижными алюминиевыми перегородками на три ступени дифференциальной откачки (I, II, III). Скиммер, служащий для формирования газовой струи, закреплен на перегородке, разделяющей камеры I и II (на рис. 2 приведены значения давления в камерах).

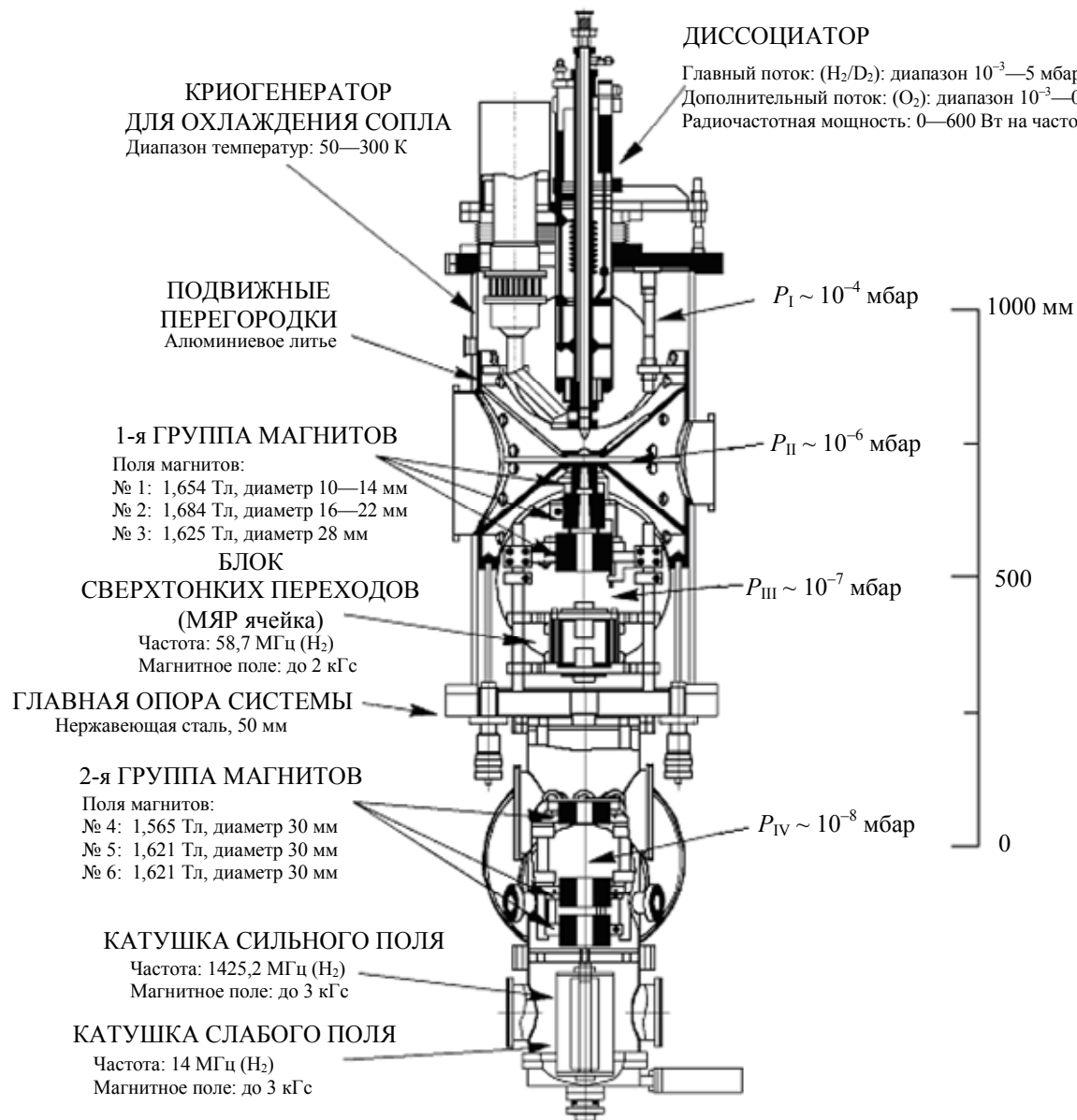


Рис. 2

Конструкция верхнего фланца позволяет выполнить перемещение оси сопла относительно оси скиммера во всех направлениях. Применение гибкого вакуумного соединения между фланцем диссоциатора и верхним фланцем вакуумной камеры позволяет варьировать

расстояние между соплом и скиммером без нарушения вакуума. На перегородке, разделяющей камеры II и III, установлен коллиматор, окончательно формирующий газовую струю.

Спин-сепарирующая магнитная система. Разделение пучка атомов по ориентации электронного спина происходит в неоднородном магнитном поле „шестиполюсных“ магнитов (рис. 3). Характерным свойством такого магнита является то, что он создает аксиально-симметричное поле, фокусирующее атомы, магнитный момент которых ориентирован параллельно радиусу-вектору \mathbf{r} , и дефокусирует атомы с противоположной ориентацией магнитного момента. Сила \mathbf{F} , действующая на атом и ответственная за фокусировку и дефокусировку, определяется следующим образом:

$$\mathbf{F} = -\nabla W = -\frac{\partial W}{\partial B} \frac{\partial B}{\partial r} \frac{\mathbf{r}}{r} = \begin{cases} -\mu_{\text{eff}} \frac{\partial B}{\partial r} \frac{\mathbf{r}}{r} & m_j = +1/2 \quad (\text{фокусировка}), \\ +\mu_{\text{eff}} \frac{\partial B}{\partial r} \frac{\mathbf{r}}{r} & m_j = -1/2 \quad (\text{дефокусировка}), \end{cases}$$

где W — потенциальная энергия, B — магнитное поле и μ_{eff} — эффективный магнитный момент атома.

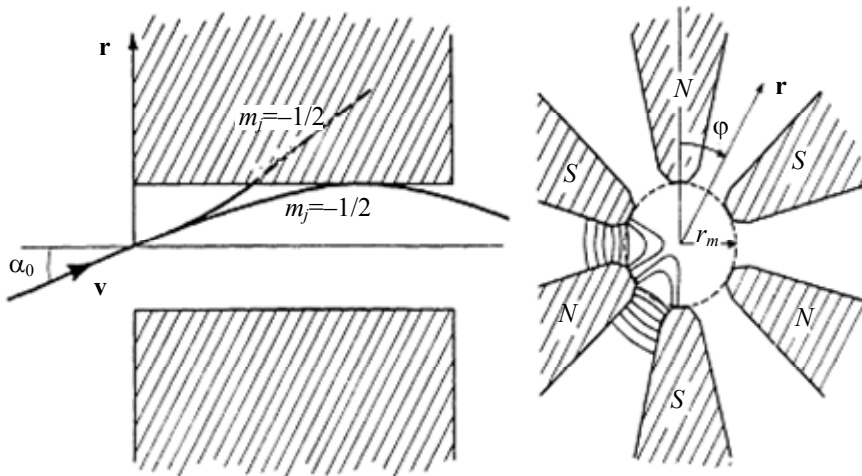


Рис. 3

Таким образом, состояния с проекциями электронного спина $m_j = +1/2$ и $m_j = -1/2$ пространственно разделяются в сильном неоднородном магнитном поле. В результате атомарный компонент с $m_j = -1/2$ выбывает из пучка и удаляется насосами, обеспечивающими откачку вакуумной камеры [4].

Блоки сверхтонких переходов. Вторым важнейшим элементом источника помимо спин-сепарирующих „шестиполюсных“ магнитов, отвечающим за создание поляризованного пучка, является система блоков сверхтонких переходов. Именно здесь индуцируются переходы между уровнями сверхтонкого расщепления для создания той или иной конфигурации заселенности уровней.

Принцип действия блоков сверхтонких переходов состоит в следующем. Уровни энергии атома, помещенного во внешнее магнитное поле B , в соответствии с эффектом Зеемана, расщепляются на $2F + 1$ подуровней. Воздействие высокочастотным полем с частотой, соответствующей энергетической разности уровней сверхтонкого расщепления для данного B , приводит к возбуждению переходов между заданными уровнями. В силу того что в равновесном состоянии переходы происходят в обе стороны (поглощение и вынужденное излучение), для атомов пучка необходимо создать условия, при которых исключается возможность обратных переходов. Эта задача решается путем возбуждения переходов в градиентном магнитном поле, т.е. для атома, движущегося в таком поле, условия для перехода складываются

лишь в ограниченной области пространства, где частота соответствует величине поля. Следует отметить, что амплитуда ВЧ-поля, или, иными словами, плотность фотонов, не должна быть слишком большой, поскольку в этом случае один и тот же атом может испытывать более одного взаимодействия с фотоном, что приведет к обратным переходам и, следовательно, снизит поляризацию пучка [5].

Поляриметр лэмбовского сдвига. В работе поляриметра (рис. 4) используется эффект, открытый в 1950-е гг. Лэмбом и Резерфордом. Он заключается в том, что уровни $2S_{1/2}$ и $2P_{1/2}$ у атома водорода должны обладать одинаковыми энергиями, согласно релятивистской теории Дирака, но У. Лэмб обнаружил, что энергии этих уровней различаются на $4,4 \cdot 10^{-6}$ эВ. Это расщепление уровней получило название лэмбовского сдвига.

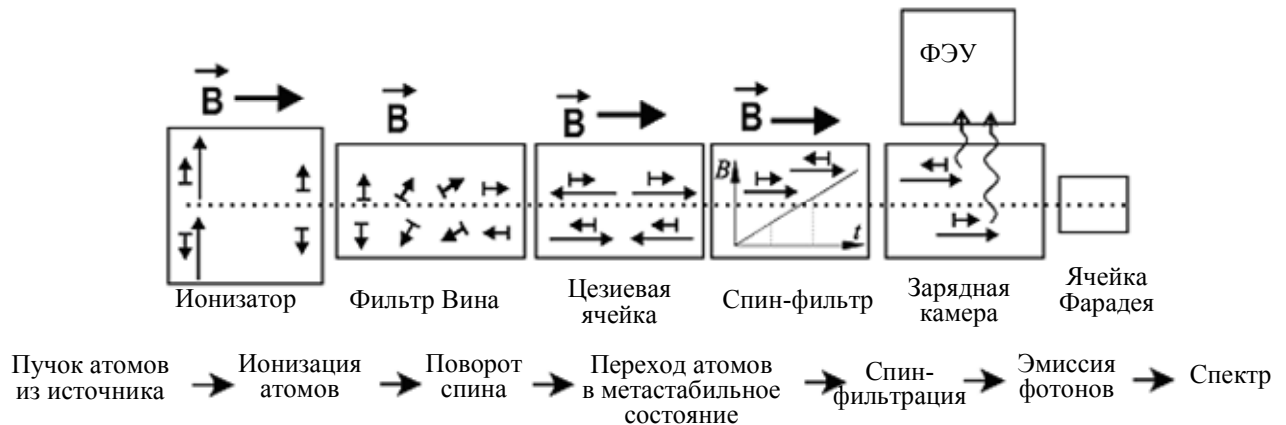
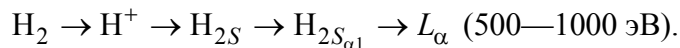


Рис. 4

Принцип действия такого поляриметра следующий. Пучок атомов ионизируется в сильном магнитном поле, что позволяет исключить деполаризационные эффекты при электронном ударе. Затем пучок ионов попадает в фильтр Вина, где спины атомов поворачиваются на 90° и фильтруются по скоростям, так как электрическое и магнитные поля, перпендикулярные друг другу в фильтре Вина, не меняют траекторию движения только частиц с определенными скоростями. Далее ионы, попадая в цезиевую ячейку, в результате зарядово-обменной реакции образуют атомы в $2S$ метастабильном состоянии. Затем пучок проходит через спин-фильтр, который в зависимости от магнитного поля пропускает атомы с $m_j = +1/2$ и определенным значением m_l , а атомы с $m_j = -1/2$ при этом разряжаются в основное состояние. Попав в неоднородное электрическое поле, атомы переходят в основное состояние, испуская фотон (линия $L\gamma$ - α). Общая схема переходов:



Таким образом, измерив число испущенных фотонов как функцию магнитного поля в спин-фильтре, можно говорить о заселенности уровней с определенным m_l и, следовательно, о поляризации пучка на входе в ионизатор.

Детекторная система предназначена для регистрации продуктов реакции. Детектирование будет производиться с помощью PIN-диодов. В окончательном варианте планируется использовать 4- π -детекторную систему с 60 %-ным заполнением. Это примерно 320 кремниевых PIN-фотодиодов (Hamamatsu S3590). Площадь одного диода составляет 1 см^2 .

На этапе тестирования системы предполагается создание прототипа из двух сборок по 4 диода, расположенных напротив друг друга. Это позволит произвести тестовый запуск установки, проверить работу детекторов в вакууме и сделать тестовые измерения.

Тестовая система установлена на вращающемся 4- π -карданном подвесе и управляется двумя шаговыми двигателями с хорошим угловым разрешением ($0,1^\circ$).

Вся система помещена в детекторную камеру, соединенную с остальными компонентами установки (рис. 5, здесь 1 — корпус камеры; 2 — вакуумные электрические вводы; 3 — центральный канал; 4 — вакуумные механические вводы; 5 — вакуумная камера; 6 — центральный фланец; 7 — входные каналы; 8 — привод; 9 — карданный подвес; 10 — шаговый двигатель привода; 11 — карданный подвес; 12 — сборка PIN-диодов; 13 — детекторная система). Окончательный вариант детекторной камеры находится в разработке на кафедре измерительных технологий и компьютерной томографии СПбГУ ИТМО.

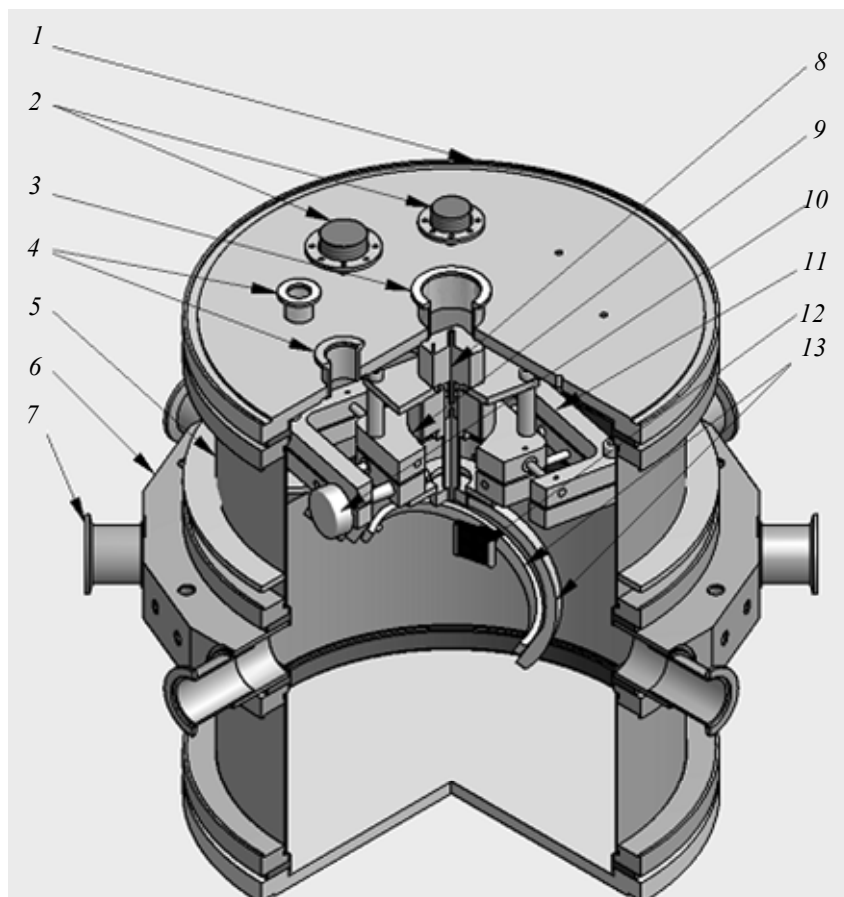


Рис. 5

Электронный комплекс сбора данных состоит из 16-канального предусилителя, на который поступают сигналы с PIN-диодов, 16-канального усилителя-формирователя, 12-разрядного АЦП и компьютерной системы сбора и обработки данных. В дальнейшем полученные данные могут обрабатываться на ЭВМ или передаваться по сетевым интерфейсам для дистанционной обработки.

Выводы. Предлагаемая экспериментальная установка позволит провести измерения, которые внесут существенный вклад в фундаментальные исследования реакций ядерного синтеза и астрофизические исследования. На основе разработанных источников поляризованных атомов будет создана установка, обеспечивающая возможность изучения реакции синтеза поляризованных атомов дейтерия. В дальнейшем с помощью методики получения поляризованных атомов ${}^3\vec{\text{H}}\text{e}$ станет возможным осуществлять реакцию $\vec{d} + {}^3\vec{\text{H}}\text{e} \rightarrow {}^4\vec{\text{H}}\text{e} + p$ с поляризованными исходными атомами. Эта реакция наиболее перспективна для использования в реакторе ядерного синтеза вследствие отсутствия нейтронного излучения. Результаты, которые будут получены при выполнении комплекса работ предлагаемого проекта, чрезвычайно важны для дальнейших исследований проблем ядерного синтеза и перспектив термоядерной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paetz gen Schieck H. Experiments on four-nucleon reactions // *Few Body Syst.* 1988. Vol. 5. P. 171—207.
2. Leonard D. S. et al. Contribution to Few-Body-17. 2003. P. 264.
3. Glockle W. et al. The three-nucleon continuum: achievements, challenges and applications // *Phys. Rev. Rep.* 1996. Vol. 274. P.107—285.
4. Микиртычьянц М. С. Разработка и исследование источника атомарного водорода и дейтерия с ядерной поляризацией для экспериментов на внутренних пучках ускорителей. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб: ПИЯФ РАН, 2002.
5. Микиртычьянц М. С., Васильев А. А., Коптев В. П., Кравцов П. А., Зайферт Х, Лорентц Б., Ратманн Ф., Энгельс Р. Блоки сверхтонких переходов для создания ядерной поляризации в источнике поляризованного атомарного водорода и дейтерия ANKE ABS. Препринт ПИЯФ РАН, 2002.

Сведения об авторах

- Сергей Николаевич Терехин** — Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; научный сотрудник; E-mail: serzh@gti.ru, lab19@yandex.ru
- Александр Анатольевич Васильев** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; заведующий кафедрой; E-mail: vassilie@pnpi.spb.ru
- Марат Евгеньевич Взнуздаев** — канд. хим. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: marat@pnpi.spb.ru
- Леонид Михайлович Коченда** — канд. техн. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; ведущий научный сотрудник; E-mail: kotch@pnpi.spb.ru
- Илья Юрьевич Иванов** — Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший лаборант; E-mail: ivannov_ilya@mail.ru
- Сергей Степанович Киселев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Мария Яковлевна Марусина** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: marusina_m@mail.ru
- Петр Андреевич Кравцов** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН физики, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: pkravt@gmail.com
- Александр Васильевич Надточий** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; старший научный сотрудник; E-mail: avnad@pnpi.spb.ru
- Виктор Алексеевич Трофимов** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: vtrof@gmail.com

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.