ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 533.9.082.79

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ

©2024 г. Е. И. Пинженин[a],*, В. В. Максимов[a],**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11

**e-mail: e.i.pinzhenin@inp.nsk.su*

***e-mail: v.v.maximov@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 31.05.2023 г.

После доработки 13.09.2023 г.

Принята к публикации 22.12.2023 г.

Описан диагностический комплекс, созданный на основе газодинамической ловушки (ГДЛ), для регистрации продуктов синтеза ядер дейтерия, а также рентгеновских и гамма-квантов, возникающих в результате взаимодействия перегретых электронов с элементами конструкции и в результате захвата нейтронов ядрами окружающих материалов. В его состав входят следующие три подсистемы. Первая подсистема создана для регистрации продольного профиля интенсивности dd-реакции. Она построена на основе диодов, которые чувствительны к протонам с энергией 3.02 МэВ, и предусилителей, способных работать с диодами большой площади, смонтированными в специально разработанные детекторные модули. Детекторы расположены внутри вакуумной камеры ГДЛ, они работают в режиме счета отдельных частиц, что позволяет вести абсолютные измерения потока продуктов реакции с временным разрешением около 100 мкс. Такие детекторы были разработаны с учетом опыта эксплуатации на ГДЛ детектора протонов с энергией 3.02 МэВ на основе экспериментального диода. Вторая подсистема – ранее разработанные детекторы на основе пластикового сцинтиллятора СПМ-5 и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Они работают в токовом режиме и предназначены для измерения интенсивности генерации нейтронов с временным разрешением до 25 мкс. В экспериментах с дополнительным нагревом эти детекторы стали использоваться (совместно с протонными детекторами) для определения вклада гамма-квантов и жесткого рентгеновского излучения. Третья подсистема – недавно разработанный спектрометр

`

нейтронов и гамма-квантов на основе стильбенового сцинтиллятора и ФЭУ, он впервые применен в эксперименте с дейтериевой плазмой на ГДЛ. Детектор позволяет разделять частицы различных сортов, в том числе в режимах работы установки, в которых происходит генерация перегретых электронов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Диагностика продуктов термоядерной реакции является важным экспериментальным инструментом, использующимся в научной программе по исследованию газодинамической ловушки (ГДЛ) [1]. Установка работает в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера. Ионы плазмы в ГДЛ можно условно разделить на две компоненты: теплые и быстрые ионы. Теплые ионы имеют плотность порядка 10^{13} см$^{-3}$ и относительно невысокую температуру (порядка 100 эВ). Эта компонента имеет функцию распределения, близкую к максвелловской, и удерживается в газодинамическом режиме. Особенностью экспериментов на ГДЛ является использование системы атомарной инжекции с мощностью около 5 МВт и длительностью 5 мс. В результате процессов захвата инжектируемых пучков в плазме возникает популяция быстрых ионов со средней энергией около 10 кэВ и максимальной энергией, соответствующей энергии инжекции 22–25 кэВ. Частоты их кулоновских столкновений оказываются малы по сравнению со временем продольного движения между пробками. В результате быстрые ионы удерживаются, как в классическом пробкотроне, и имеют сильнонеравновесную функцию распределения. Эти ионы имеют относительно узкое распределение по питч-углам, поэтому профиль их плотности вдоль оси установки имеет яркий пик вблизи области остановки. Анизотропия функции распределения быстрых ионов является причиной развития микронеустойчивостей, которые могут приводить к перестроению функции распределения быстрых частиц и, соответственно, к потерям.

В экспериментах с инжекцией дейтерия в системе идут следующие реакции синтеза:

$d+d \rightarrow {}^3He(0.82\ МэВ) + n(2.45\ МэВ) \approx 50\%$,

$d+d \rightarrow T(1.01\ МэВ) + p(3.02\ МэВ) \approx 50\%$.

Обе ветви реакции имеют практически одинаковое сечение в интересном для экспериментов на ГДЛ интервале энергий до 100 кэВ. Нейтронный выход (он соответствует половине всех реакций в системе) можно измерять по регистрации потоков любых из приведенных частиц, однако наиболее удобно использовать нейтроны с энергией 2.45 МэВ и протоны с энергией 3.02 МэВ. Динамика абсолютного выхода реакции синтеза и его пространственное распределение позволяют делать выводы о функции распределения быстрых ионов. Эти данные дополняют информацию, получаемую при анализе энергий атомов перезарядки, а также диамагнитных,

`

болометрических и спектроскопических измерений на ГДЛ. При этом следует учитывать, что реакции синтеза происходят не только при парных столкновениях быстрых ионов, но и при столкновении быстрых ионов с теплыми ионами, если обе компоненты дейтериевые. Помимо этого, пространственные распределения нейтронного выхода на ГДЛ прямо моделируют таковые для установок следующего поколения, например, газодинамической многопробочной ловушки (ГДМЛ) [2], или генератора нейтронов с энергией 14 МэВ на основе открытой ловушки с инжекцией дейтерия и трития [3].

Измерение пространственного профиля интенсивности реакции синтеза непосредственно по регистрации самих нейтронов осложняется рядом обстоятельств. Во-первых, для выделения узкой пространственной области наблюдения необходимо использовать массивные коллимационные системы. Значительное отражение нейтронов от элементов установки (вакуумной камеры, катушек магнитного поля) приводит к ухудшению пространственного разрешения диагностики. Во-вторых, сцинтилляторы, которые используются в детекторах, чувствительны к гамма-квантам, возникающим при захвате термализованных нейтронов, и к дополнительному тормозному излучению от горячих электронов, возникающих в некоторых режимах работы установки. В-третьих, при регистрации в режиме счета отдельных частиц протоны отдачи имеют энергетический спектр, простирающийся от нулевой энергии до энергии исходных нейтронов, в результате возникает ошибка при учете импульсов с малой амплитудой. Эти и другие факторы приводят к необходимости принятия дополнительных мер по калибровке детекторов, связанных, в том числе, с численным моделированием.

Измерение профиля нейтронного выхода по регистрации протонов с энергией 3.02 МэВ является более привлекательной альтернативой. Возможность работы детекторов в режиме счета отдельных протонов позволяет измерять абсолютные значения потока продуктов реакции, а значит, и делать вывод обо всех реакциях синтеза дейтерия в системе. Временное разрешение в этом случае будет определяться скоростью счета импульсов. Дополнительным преимуществом является то, что поток протонов может быть легко коллимирован. Наиболее серьезные ограничения этого метода заключаются в том, что траектория вылета протона искривляется магнитным полем. На ГДЛ вблизи области остановки ларморовский радиус протона с энергией 3.02 МэВ составляет примерно 25 см для поля 0.7 Тл при движении поперек магнитного поля, что позволяет регистрировать протоны детекторами, расположенными вблизи плазмы.

На ГДЛ для измерения интенсивности реакций ядерного синтеза создана комплексная система, в состав которой входят следующие элементы.

`

Набор детекторов термоядерных протонов для измерения продольного профиля интенсивности термоядерной реакции на основе диодов с тонким мертвым слоем, которые работают в режиме счета отдельных частиц. При необходимости перед диодами устанавливаются пластинчатые коллиматоры. Расположение детекторов внутри вакуумной камеры ГДЛ схематично показано на рис. 1. Регистрация заряженных продуктов реакции синтеза (в дополнение к нейтронной регистрации) развивается на ГДЛ несколько лет, она стала основным инструментом для исследования пространственных распределений эмиссии продуктов термоядерной реакции. Отметим, что регистрация продольного профиля в ранних экспериментах сопровождалась перестановкой детектора и была связанна с разгерметизацией установки, что требовало большого количества экспериментальных выстрелов [4, 5]. Затем регистрация протонов была отработана с использованием одиночного детектора протонов с энергией 3.02 МэВ на основе экспериментального диода площадью 0.5 см^2 [6, 7]. В настоящей работе представлена впервые созданная многоканальная система, способная регистрировать пространственный профиль интенсивности реакции синтеза в каждом выстреле с временным разрешением около 100 мкс.

Рис. 1

Детекторы на основе органического сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) обеспечивают измерение потока продуктов реакции синтеза с временным разрешением около 25 мкс [6, 7]. Такие детекторы расположены снаружи вакуумной камеры вблизи точек остановки, они работают в потоковом режиме, чувствительны к нейтронам, сопутствующим гамма-квантам, возникающим вследствие захвата термализованных нейтронов. После начала экспериментов с дополнительным СВЧ-нагревом на датчиках стал наблюдаться дополнительный сигнал, связанный с регистрацией перегретых электронов. Совместная работа сцинтилляционных детекторов с детекторами протонов с энергией 3.02 МэВ позволяет отделять вклад в сигнал рентгеновского излучения.

Спектрометр нейтронов и гамма-квантов на основе стильбенового сцинтиллятора и ФЭУ был совместно разработан в ИЯФ СО РАН и ТРИНИТИ [8] для спектрометрии нейтронов в экспериментах с дейтериевой и дейтерий-тритиевой плазмой. Такой детектор впервые применен на ГДЛ в плазменном эксперименте с инжекцией дейтерия.

Следующие разделы настоящей работы посвящены описанию каждой из подсистем.

`

2. ДЕТЕКТОРЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ПРОТОНОВ НА ОСНОВЕ ДИОДОВ

В ранних экспериментах на ГДЛ при регистрации термоядерных протонов приемным элементом являлась тонкая полоса сцинтиллятора, сопряженная с ФЭУ. Такой вариант детектора успешно работал, но нуждался в дополнительных экспериментах для вычитания сопутствующих сигналов нейтронов и гамма-квантов [4, 5].

Применение полупроводниковых PIN-диодов (между областями электронной (*n*) и дырочной (*p*) проводимостей находится собственный (нелегированный) полупроводник (*i*-область)) для прямой регистрации частиц оказалось более удобным. Для успешной работы такие диоды должны иметь тонкий поверхностный слой, широкую переходную область, низкий ток утечки и необходимую по условиям эксперимента площадь. На диод подается запирающее напряжение. Заряженные частицы (или фотоны) через поверхностный слой попадают в область *p*–*n*-перехода диода и при торможении вызывают появление электрон-дырочных пар, количество которых пропорционально энергии частицы. Появившиеся носители заряда вызывают ток, преобразуемый зарядочувствительным предусилителем в импульс напряжения. На ГДЛ ранее уже использовались экспериментальные диоды, разработанные в Институте физики полупроводников СО РАН, имеющие площадь чувствительной поверхности 0.5 и 3 см^2 [6, 7]. Новые детекторные модули построены на основе серийно выпускаемых диодов (Д1, Д4.5), разработанных компанией ООО «СНИИП-плюс» [9], площадью 1 и 4.5 см^2. Данные диоды имеют тонкий поверхностный слой (400 нм) и толщину чувствительной области более 100 мкм.

При разработке детекторных модулей использовался ранее опробованный на ГДЛ подход к проектированию таких датчиков, который заключается в следующем. Диод расположен как можно ближе к плазме и защищен алюминиевой фольгой толщиной 10 мкм от оптического изучения, низкоэнегитических продуктов реакции синтеза дейтерия (^{3}He, T) и атомов, покидающих плазму. Быстрый широкополосный предусилитель расположен близко к детектору для уменьшения электромагнитных помех и минимизации емкости соединительного кабеля [7].

Предусилитель с диодом заранее устанавливается в специально разработанный детекторный модуль, фотография которого приведена на рис. 2, а дизайн – на рис. 3. Диод *1* расположен со стороны плазмы в герметичном корпусе *2*, который разделяет вакуум и атмосферу, а предусилитель *3* расположен с другой стороны стенки, что позволяет избежать проблем с перегревом электронных компонентов. Выводы диода подсоединяются через герметизированные отверстия. Детекторный модуль может быть протестирован и отлажен до установки в вакуумный объем.

Рис. 2, 3

`

Далее детекторный модуль устанавливается на крышку специального фланца, которая подсоединяется к ГДЛ (рис. 3) и обеспечивает размещение диода вблизи поверхности плазмы. Питание предусилителя обеспечивается аккумуляторным блоком, что улучшает его защищенность от помех. Включение блоков питания может осуществляться по оптическому каналу связи системой управления ГДЛ на время, необходимое для измерений в эксперименте.

В детекторных модулях используется специально разработанный широкополосный малошумящий предусилитель, который позволяет работать с диодами большой площади (и емкости) [10]. Такие предусилители были протестированы при работе с диодами площадью от 1 см^2 до 4.5 см^2 в экспериментах по регистрации альфа-частиц с энергией 5 МэВ от радиоизотопного источника ^{239}Pu. Длительность импульса от отдельной альфа-частицы (и термоядерного протона) составляет 40 нс, отношение сигнал/шум – порядка 20. Регистрация ведется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с разрешением 12 бит и частотой дискретизации 500 МГц [11] в осциллографическом режиме без предварительной обработки.

Рис. 4, 5

На рис. 4 приведены фрагменты осциллограммы (для разных временных масштабов), на которой видны пики от протонов с энергией 3 МэВ, зарегистрированные в плазменном эксперименте на ГДЛ. Длительность записи составляет 10.2 мс, что позволяет зарегистрировать весь плазменный эксперимент. Осциллограммы считываются из архива средствами пакета программ и библиотек ROOT [12]. Программная обработка позволяет считать частицы даже в случае наложения импульсов, если оно не превышает 10%, и исключать ошибки, связанные с мощными электромагнитными всплесками.

На рис. 5 приведено энергетическое разрешение одного из детекторов с площадью чувствительной поверхности 1 см^2. Оно составляет около 470 кэВ при регистрации протонов с энергией 2.77 МэВ (энергия, до которой ослабляются протоны с энергией 3 МэВ после прохождения алюминиевой фольги толщиной 10 мкм). Такого разрешения достаточно для пересчета пиков, отделения их от шумов и проведения измерения потока продуктов реакции синтеза. Сравнение с регистрацией альфа-частиц подтверждает практически полное поглощение энергии протонов в чувствительной области диода.

Построение временной эволюции выхода реакции синтеза J (J – количество нейтронов (или протонов) продуктов реакций синтеза в единицу времени, возникающее на единице длины плазменного столба установки) на ГДЛ (рис. 6) проводится путем суммирования частиц по интервалам, которые определяют временное разрешение при условии достаточно большого количества частиц. При максимальной скорости счета $2.5\cdot10^6$ событий в секунду (вероятность наложения событий 10%) временное разрешение составляет 100 мкс. Дополнительно на рис. 6

Рис. 6

приведены временная диаграмма работы систем создания и нагрева плазмы и сигнал с диамагнитной петли, расположенной вблизи точки остановки быстрых частиц. Этот сигнал равен вытесненному плазмой магнитному потоку и пропорционален энергии, запасенной в быстрых ионах плазмы. Приведенный сигнал характерен для плазменных экспериментов на ГДЛ без магнитогидродинамических и микронеустойчивостей. Отметим, что под временным разрешением имеются в виду характерные времена плазменных процессов, которые могут быть исследованы с помощью настоящей диагностики. Поэтому временное разрешение фактически соответствует времени набора статистики, необходимому, чтобы измерить поток продуктов с необходимой точностью. Для экспериментов на ГДЛ обычно измеряются значения выхода термоядерной реакции из соответствующих областей плазмы с точностью 10%, что соответствует времени набора статистики 100 мкс.

Количество частиц, попадающих на диод, зависит от места расположения детектора, его площади и степени коллимации. Вблизи области остановки детали детектора не должны располагаться ближе 24 см от оси установки, чтобы избежать потерь быстрых ионов. Выбор параметров детекторов и их расстановка проводятся по результатам моделирования кодом DOL [13]. Продольный профиль J, измеренный детекторами протонов для стандартной магнитной конфигурации ГДЛ, представлен на рис. 7, расчетная кривая нормирована на измеренные значения (минимизировано среднеквадратичное отклонение расчетных и экспериментальных данных), поскольку код DOL является одномерным и не учитывает радиальные распределения параметров плазмы.

Рис. 7

Таким образом, диагностика термоядерных протонов на основе диодов позволяет измерять абсолютные значения выхода реакции синтеза J на ГДЛ и изучать его пространственные распределения с временным разрешением около 100 мкс.

3. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

Другим средством мониторинга dd-активности на ГДЛ являются детекторы на основе органического сцинтиллятора и ФЭУ. Такие детекторы успешно применялись в экспериментах на ГДЛ ранее [7], и в рамках настоящей работы их модернизация не проводилась. В статье [6] детекторы применялись совместно с протонными детекторами на основе экспериментальных PIN-диодов. В настоящей работе более подробно обсуждается вклад в сигнал рентгеновского излучения, возникающего при дополнительном нагреве в экспериментах на ГДЛ.

`

Детекторы расположены за пределами вакуумной камеры ГДЛ на расстоянии 0.6 м от оси плазмы и на расстоянии 1.2 м от экваториальной плоскости (соответствующий детектор обозначен цифрой *5* на рис. 1). В детекторе применяется сцинтиллятор СПМ-5 (время высвечивания сцинтиллятора составляет 5 нс, диаметр сцинтиллятора – 25 мм, длина 100 мм), сопряженный с ФЭУ Hamamatsu R2490-05 (в составе модуля с делителем Hamamatsu H2611). ФЭУ изготовлен по сеточной технологии (fine mesh), что позволяет ему работать в магнитных полях до 1 Тл без дополнительной магнитной защиты, если угол между осью симметрии ФЭУ и вектором магнитной индукции в месте его расположения не превышает 30°.

Тем не менее, для таких ФЭУ наблюдается изменение чувствительности в зависимости от ориентации относительно силовых линий и напряженности магнитного поля. Для контроля влияния магнитного поля на коэффициент усиления ФЭУ применяется светодиод, встроенный в детектор. За время плазменного разряда чувствительность остается постоянной. Калибровка коэффициента усиления ФЭУ может применяться при изменении режима работы на ГДЛ для разных экспериментальных условий, которые связаны с изменением величины и профиля магнитного поля.

Сцинтилляционный детектор чувствителен как к нейтронам, так и к рентгеновским квантам и гамма-фону. Существует несколько источников квантов гамма- и рентгеновского диапазонов в плазменных экспериментах на ГДЛ. В экспериментах без дополнительного сверхвысокочастотного (СВЧ) нагрева это взаимодействие нейтронов с конструкционными материалами установки, оборудования, стен зала и т.д. и последующие ядерные реакции с испусканием гамма-излучения различных энергий. Суммарный сигнал от детектора (от нейтронов и гамма-квантов, возникших в результате n–γ-реакций) пропорционален интенсивности реакции синтеза дейтерия. Регистрация ведется в потоковом режиме с помощью 12-битного АЦП с частотой дискретизации 1 мкс. Временное разрешение диагностики связано с флуктуациями сигнала, для ГДЛ оно составляет примерно 25 мкс.

Источником рентгеновских квантов, которые регистрируются сцинтилляционным детектором, являются тормозное излучение, возникающее в экспериментах с дополнительным СВЧ-нагревом плазмы, как результат потери перегретых электронов на лимитерах и торцевых поглотителях плазмы. Энергия рентгеновского излучения, попадающая на сцинтилляционный детектор, ограничена прозрачностью стенок вакуумной камеры ГДЛ (100 кэВ).

Для нормировки сигнала сцинтилляционного детектора используются данные детектора термоядерных протонов, установленного на расстоянии 175 см от экваториальной плоскости ГДЛ (область максимальной интенсивности dd-реакции). Соответствующий детектор обозначен

!"

F+0=/9"Mb"0.," 4+0%" #%",")4+0%Ud" 34+7858.," 74898..,:" 5+,-4,99," 4,O/1?" 0+0189?" 0/C5,.+:" +"
.,-487," 3=,C9?" 7" @20384+98.1 8" r&\ ]34/O/89" -,C," .," I(J'" 34+7858.?" 5,..?8" 0/"
0<+.1+==:<+/../-/" 581821/4,B" 4,O/1,DE8-/" 7" 3/1/2/7/9" 48>+98%" (/3/=.+18=A./" 34+7858.?"
5,..?8" 0" 581821/4," 1849/:584.?[" 34/1/./7B" 4,O/1,DE8-/" 7" 0F81./9" 48>+98%" WG+O2," 7"
+C9848.++" .8;14/../-/" 3/1/2," 0<+.1+==:<+/. .?9" 581821/4/9" 0/01,7=:81" nh" H/34858=:810:"
/1./G8.+89" 0+-.,=•G69K%" S/F./01A" +C9848.+:" 3/1/2," F,01+<" 581821/4/9" 1849/:584.?["
34/1/./7"/34858 =:810:"01,1+01+F802+9"4,CO4/0/9"34+"4,O/18"7"48>+98"0F81,"/158=A.?["F,01+<B"
/.,"0/01,7=:81"dh"34+"74898../9"4,C48G8.++"$TT"920"H5=:"34+7858..?["5,..?[K%"W1981+9B"F1/"
.," .,F,=A./;" 01,5++" 3=,C98../-/" 4,C4:5," 4,C=+F+8" 98>56" 2,.,=,9+" 5+,-./01+2+" 9/>81"
5/01+-,1A"#TThB"F1/"9/>81"O?1A"07:C,./"0"3/1848;"3848-481?["@=8214/./7B"2/1/4?8"P/49+46D10:"
34+" r&\ ]34/O/8" 3=,C9?%" S89" .8" 98.88B" +C" 34+7858..?[" 5,..?[" 3/=6F8." 2/@PP+<+8.1B"
3/C7/=:DE+;"./49+4/7,1A"0+-.,="0<+.1+==:<+/../-/"581821/4,".,"5,..?8"3/=634/7/5.+2/7/-/"
581821/4," +" +C984:1A" +9" 7?[/5" 48,2<++" 0+.18C," H5=:" 5,..?[" @20384+98.1,=A.?[" 60=/7+;" +"
.,34:>8.+:" .," qVNK%" (/" 4,C7+1+:" .8601/;F+7/01+" 0+-.,=" 0<+.1+==:<+/../-/" 581821/4," +"
5,..?8B" 3/=6F8..?8" +C" 2/=+F8017," +936=A0/7" 0" 5,1F+2," 1849/:584.?[" 34/1/./7B" [/4/G/"
0/73,5, D1%

&" @20384+98.1,[" 0" 5/3/=.+18=A.?9" r&\].,-487/9" 3/1/2B" +C984:89?;" 581821/4/9" .,"
/0./78" 5+/5,B" 9/>81" /1=+F,1A0:" /1" 0+-.,=," 0/" 0<+.1+==:<+/../-/" 581821/4," 73=/1A" 5/"
.802/=A2+[" 0/18." 34/<8. 1/7" H4+0%" dK%" &" 5,../9" 0=6F,8" 7" 9/98.1" 74898.+" d%YYU90" 4,C7+7,81
2+.81+F802,:".8601/;F+7/01AB"2/1/4,:"34+7/5+1"2"3/1848"3848-481?["@=8214/./7"+"/O4,C/7,.+D"
703?G2+"48.1-8./702/-/"+C=6F8.+:"H/O/C.,F8./"9,4284,9+"M"+"+".,"4+0%UdK%"),"4+0%U|"3/2,C,./"
3=,7./8" +C98.8.+8" 0+-.,=," .," 34/1/../9" 5,1F+28B" 2/1/4/8" 3/71/4:81" P/496" 0+-.,= ,"
0<+.1+==:<+/../-/" 581821/4," 34+" 48.1-8./702/;" 703?G28%" W1981+9B" F1/" 3+2+" /1" /158=A.?["
1849/:584.?["34/1/./7"5,>8"7"@1+["60=/7+:["[/4/G/"/34858=:=+0A"+"O?=+"38480F+1,.?%"(,.?8"
+C9848../-/" 7?[/5," 48,2<++" 0+.18C," .," P/.8" 703?G2+" 48.1-8./702/-/" +C=6F8.+:" .," 4+0%U"|
3/2,C,.?"1/F2,9+%!

(=:" /34858=8.+:" 72=,5," 48.1-8./702/-/" +C=6F8.+:" 7" +C9848.+:" 0<+.1+==:<+/..?9+"
581821/4,9+" +.18.0+7./01+" 48,2<++" 0+.18C," .," I(J" +03/=AC/7,=0:" 038214/9814" .8;14/./7" +"
-,99,]27,.1/7".,"/0./78"01+=AO8./7/-/"0<+.1+==:1/4,B"F1/"/O06>5,810:"5,=88!%

| "

"

`

4. СПЕКТРОМЕТР НЕЙТРОНОВ И ГАММА-КВАНТОВ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТИЛЬБЕНОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

В некоторых сцинтилляторах (стильбен, p-терфенил, NE213, BC501) форма световой вспышки различается для нейтронов, гамма-квантов и альфа-частиц. Это позволяет определить тип частицы по форме светового импульса в экспериментах по регистрации смешанного нейтронного и гамма-излучения.

Спектрометр нейтронов и гамма-квантов, применяемый на ГДЛ, состоит из стильбенового сцинтиллятора диаметром 30 мм и длиной 30 мм и фотоэлектронного умножителя PMT 9266B [14] с делителем напряжения. Высокое напряжение обеспечивается конвертером питания TRACO POWER THV 12-1000N. В состав прибора дополнительно входит быстрый предусилитель, АЦП (12 бит, 500 МГц) и программируемая логическая интегральная схема Altera Cyclone III (ПЛИС), которая обеспечивает предварительную обработку сигнала, в том числе идентификацию сорта частиц. Вся регистрирующая и питающая электроника смонтирована в цилиндрическом корпусе диаметром 70 мм и длиной 400 мм, который обеспечивает защиту от электромагнитных помех и паразитной засветки сцинтиллятора. Дополнительно в корпус встроен магнитный экран. Связь с компьютером осуществляется по протоколу Ethernet. Программное обеспечение для управления и сбора данных, в том числе изменения напряжения на делителе с помощью цифро-аналогового преобразователя, реализовано с помощью LabView.

ПЛИС обеспечивает несколько режимов работы прибора, позволяющих регистрировать отдельные импульсы, проводить калибровки для определения параметров идентификации нейтронов и гамма-квантов и режима записи спектров. Прибор позволяет отдельно записывать спектры нейтронов и гамма-квантов. Информация об энергетической калибровке прибора с помощью радионуклидных источников гамма-квантов и ускорительных источников нейтронов с энергией 2.45 и 14.1 МэВ по алгоритму разделения нейтронов и гамма-квантов, по реализации алгоритма в конкретном приборе и по эффективности сепарации частиц различного сорта прибором приведена в статье [8].

Рис. 10

На рис. 10 приведены временная диаграмма работы систем создания и нагрева плазмы на ГДЛ и сигнал сцинтилляционного детектора интенсивности реакции синтеза, полученный в эксперименте, в котором мишенная плазма в установке создавалась электронным пучком. Подробное описание этого метода генерации плазмы на ГДЛ приведено в статье [15]. Главный практический вывод состоит в том, что параметры плазмы, которая была создана электронным пучком, не имеют значительных отличий от таковых для других методов создания мишенной

плазмы, разработанных на ГДЛ [15]. Основными этапами эксперимента в этом режиме были инжекция электронного пучка во временном от 0.5 до 5 мс, ионизирующего газ и создающего начальную плазму; инжекция пучков нейтральных атомов в интервале от 3.8 до 9 мс, выполняющих основной нагрев плазмы; и работа системы дополнительного СВЧ-нагрева в интервале от 5 до 8 мс. В результате спектрометром на основе стильбена во временном интервале от 3.8 до 10 мс был зарегистрирован спектр протонов отдачи, который соответствует нейтронам с энергией 2.45 МэВ, возникающим в плазме ГДЛ (рис. 11). В это же время в канале спектрометра, который регистрирует гамма-кванты, был зарегистрирован спектр комптоновских электронов (рис. 12). Этот спектр соответствует n–γ-реакциям и не содержит информации о плазме. Тем не менее, γ-кванты, соответствующие зарегистрированному спектру, исчезают после выключения инжекторов, следовательно, их источником являются термоядерные нейтроны. Это является дополнительным свидетельством того, что сигнал детектора на основе органического сцинтиллятора и ФЭУ (описан в разд. 3) пропорционален интенсивности реакции синтеза несмотря на то, что в зарегистрированный сцинтилляционным датчиком сигнал вносят вклад как нейтроны, так и гамма-излучение (в экспериментах СВЧ-нагревом и электронным пучком).

Рис. 11, 12

Во временном интервале от 12 до 25 мс в нейтронном канале спектрометра события отсутствуют, а в гамма-канале зарегистрирован спектр комптоновских электронов, приведенный на рис. 12. Стрелками указаны максимальные энергии рентгеновских (или гамма-) квантов, при регистрации которых в стильбеновом сцинтилляторе возникают комптоновские электроны соответствующих энергий. Таким образом, вспышка рентгена свидетельствует о наличии в плазме перегретых электронов с энергией до 500 кэВ.

5. ВЫВОДЫ

Датчики протонов с энергией 3 МэВ, созданные на основе серийных диодов производства ООО “Сниип-плюс” площадью 1 см^2, показали свою эффективность в плазменном эксперименте на ГДЛ и могут быть применены на других установках. Такие детекторы были разработаны на основе опыта создания и эксплуатации одиночного детектора термоядерных протонов на основе экспериментального диода, который ранее использовался на ГДЛ. Детекторы работают в счетном режиме и измеряют абсолютные значения выхода реакции синтеза. В рамках настоящей работы создана система регистрации продольного профиля выхода реакции ядерного синтеза на установке ГДЛ. В каждом датчике используются широкополосный предусилитель и АЦП, разработанные в ИЯФ СО РАН. Пространственное разрешение диагностики составляет 20 см, временное – 100 мкс. Максимальная скорость счета отдельного детектора составляет $2.5 \cdot 10^6$

`

событий за секунду, что для диода площадью 1 $см^2$ обеспечивает вероятность наложения событий 10%.

В экспериментах на ГДЛ используется обзорный детектор потока продуктов реакции синтеза на основе сцинтиллятора и ФЭУ, который работает в потоковом режиме и обладает временным разрешением 25 мкс. Реализована нормировка сигнала со сцинтилляционного детектора на данные детектора термоядерных протонов, что позволяет вести абсолютные измерения интенсивности реакций синтеза. Эксперименты на ГДЛ с дополнительным СВЧ-нагревом сопровождаются накоплением в плазме перегретых электронов. Потеря таких электронов дает вклад в сигналы сцинтилляционного детектора. В рамках настоящей работы показано, что сопоставление данных с протонных детекторов позволяет учесть вклад рентгеновского излучения в сигналы со сцинтилляционных детекторов.

В работе показано, что спектрометр нейтронов и гамма-квантов на основе стильбенового сцинтиллятора и ФЭУ позволяет регистрировать спектр термоядерных нейтронов и получать данные о максимальной энергии перегретых электронов в плазме ГДЛ.

`

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А.А., Приходько В.В.* // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. № 5. С. 547. https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.09.037967
2. *Beklemishev A., Anikeev A., Astrelin V, Bagryansky P., Burdakov A., Davydenko V., Gavrilenko D, Ivanov A., Ivanov I., Ivantsivsky M., Kandaurov I., Polosatkin S.* // Fusion Science and Technology. 2013. V. 63. P. 46. https://doi.org/10.13182/fst13-a16872
3. *Bagryansky P.A., Chen Z., Kotelnikov I.A., Yakovlev D.V., Prikhodko V.V., Zeng Q., Bai Y., Yu J., Ivanov A.A., Wu Y.* // Nucl. Fusion. 2020. V. 60. №3. P. 036005 https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab668d
4. *Максимов В.В., Корнилов В.Н.* // ПТЭ. 2001. № 2. С. 56. https://doi.org/10.1023/A:1017571221230
5. *Maximov V.V., Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Ivanov A.A., Lizunov A.A., Murakhtin S.V., Noack K., Prikhodko V.V.* // Nuclear Fusion. 2004. V. 44. № 4. P. 542. https://doi.org/10.1088/0029-5515/44/4/008
6. *Pinzhenin E.I., Maximov V.V.* // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1771. P. 050013. https://doi.org/10.1063/1.4964207
7. *Bagryansky P., Maximov V., Pinzhenin E., Prikhodko V.* // Fusion Science and Technology. 2011. V. 59. P. 256. https://doi.org/10.13182/FST11-A11627
8. *Pinzhenin E, Khilchenko A., Zubarev P., Kvashnin A., Kashchuk Yu., Kovalev A., Obudovsky S.* // Plasma and Fusion Research. 2019. V. 14. P. 2402025. https://doi.org/10.1585/pfr.14.2402025
9. https://sniipplus.ru/
10. *Пурыга Е.А., Хильченко А.Д., Квашнин А.Н., Моисеев Д.В., Иваненко С.В.* // ПТЭ. 2022. № 1. С. 44. https://doi.org/10.31857/S0032816222010207
11. *Пурыга Е. А., Хильченко А. Д., Квашнин А. Н., Зубарев П. В., Иванова А. А., Иваненко С. В.* // ПТЭ. 2012. № 3. С. 75. https://doi.org/10.1134/S0020441212020170
12. https://root.cern/
13. *Юров Д.В., Приходько В.В., Цидулко Ю.А.* // Физика Плазмы. 2016. Т. 42. № 3. С. 217. https://doi.org/10.7868/S0367292116030100
14. https://et-enterprises.com/
15. *Soldatkina E., Pinzhenin E., Korobeynikova O., Maximov V., Yakovlev D., Solomakhin A., Savkin V., Kolesnichenko K., Ivanov A., Trunev Yu., Voskoboynikov R., Shulzhenko G., Annenkov V.,*

`

Volchok E., Timofeev I., Bagryansky P. // Nuclear Fusion. 2022. V. 62. P. 066034. https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac3be3

`

СПИСОК РИСУНКОВ

Рис. 1. Установка на основе газодинамической ловушки: *1* – приемник плазмы, *2* – волноводы системы СВЧ-нагрева плазмы, *3* – инжекторы нейтральных атомов, *4* – спектрометр нейтронов и гамма-квантов на основе стильбена, *5* – детектор на основе сцинтиллятора и ФЭУ, *6* – центральная ячейка ГДЛ, *7* – расширительный бак, *8* – быстрые ионы, *9* – катушка магнитной пробки, *10* – лимитер, *11* – пучки атомов дейтерия, *12–15* – детекторы термоядерных протонов на основе диодов.

Рис. 2. Детекторный модуль, подготовленный для установки на ГДЛ.

Рис. 3. Трехмерная модель детекторного модуля: *1* – диод с площадью чувствительной поверхности 1 см^2, *2* – деталь, которая разделяет вакуум и атмосферу, *3* – место расположения предусилителя, *4* – кожух, в который устанавливается блок аккумуляторов для питания предусилителя (управляется по оптическому каналу), *5* – стандартный вакуумный фланец ГДЛ.

Рис. 4. Пример фрагмента осциллограммы, полученной с детектора на основе диода площадью 1 см^2.

Рис. 5. Энергетическое разрешение детектора при регистрации протонов с энергией 3 МэВ (замедленных в алюминиевой фольге толщиной 10 мкм). Приведены данные для диода с площадью чувствительной поверхности 1 см^2.

Рис. 6. Временная диаграмма работы систем создания и нагрева плазмы (верхний график). Дополнительно приведен сигнал с диамагнитной петли, расположенной вблизи точки остановки быстрых частиц. Временная эволюция потока термоядерных протонов, измеренных в эксперименте на ГДЛ (нижний график). Приведены данные с четырех датчиков, расположенных вдоль установки. Временное разрешение составляет 100 мкс.

`

Рис. 7. Продольные профили выхода реакции синтеза дейтерия (одна ветвь), полученные в результате моделирования (сплошная линия) и экспериментальных измерений (точки).

Рис. 8. Временная диаграмма работы систем создания и нагрева плазмы (верхний график). Дополнительно приведен сигнал диамагнитной петли, расположенной вблизи точки остановки быстрых частиц. Сигнал детектора термоядерных протонов (средний график). Выход реакции синтеза на единицу длины установки, измеренный протонным детектором и сцинтилляционным детектором в эксперименте со вспышкой рентгеновского излучения (нижний график). Цифрами обозначены вспышки рентгеновского излучения при СВЧ-нагреве плазмы (*1*, *2*) и СВЧ-пробое газа (*3*).

Рис. 9. Сигнал протонного детектора во временном интервале от 8.1 до 8.9 мс в момент вспышки рентгеновского излучения (верхний график). Сигнал сцинтилляционного детектора (нижний график). Точками показан измеренный по количеству протонов выход реакции синтеза. Цифрами *1* и *2* обозначены вспышки рентгеновского излучения, зарегистрированные сцинтилляцинным датчиком.

Рис. 10. Временная диаграмма работы систем создания и нагрева плазмы (верхний график). Дополнительно приведен сигнал с диамагнитной петли. Сигнал со сцинтилляционного детектора (нижний график).

Рис. 11. Спектр протонов отдачи при регистрации нейтронов с энергией 2.45 МэВ на ГДЛ.

Рис. 12. Спектр комптоновских электронов, зарегистрированных в стильбеновом сцинтилляторе, в экспериментах по регистрации вспышек рентгеновского излучения на ГДЛ.

цифры - курсив

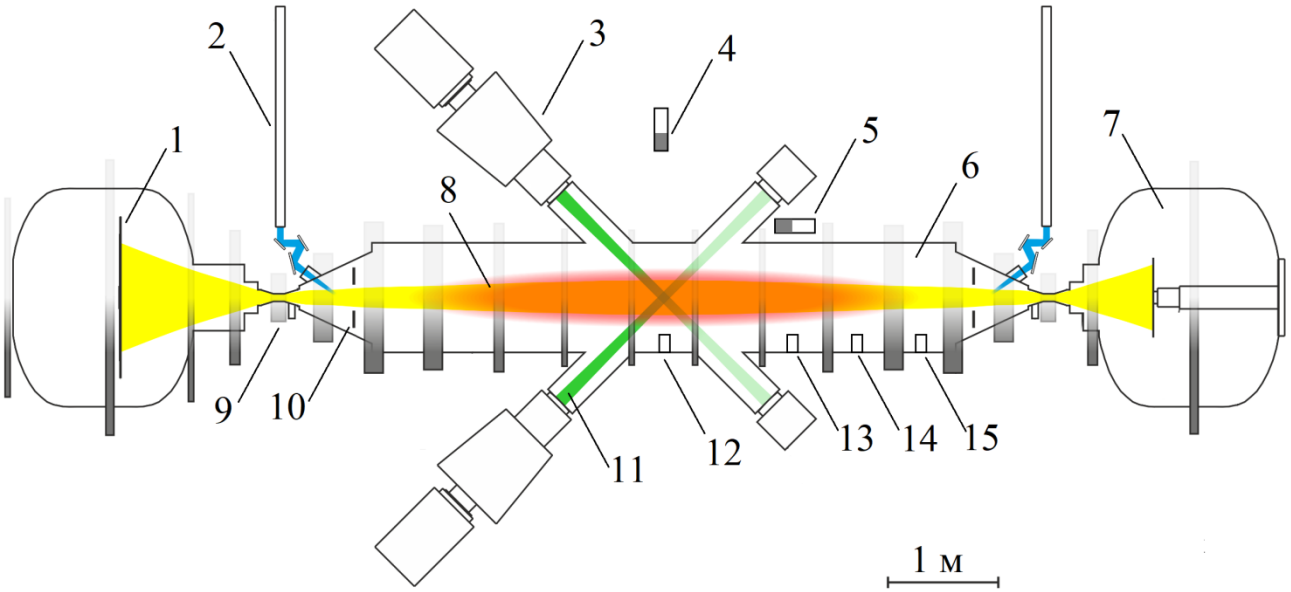
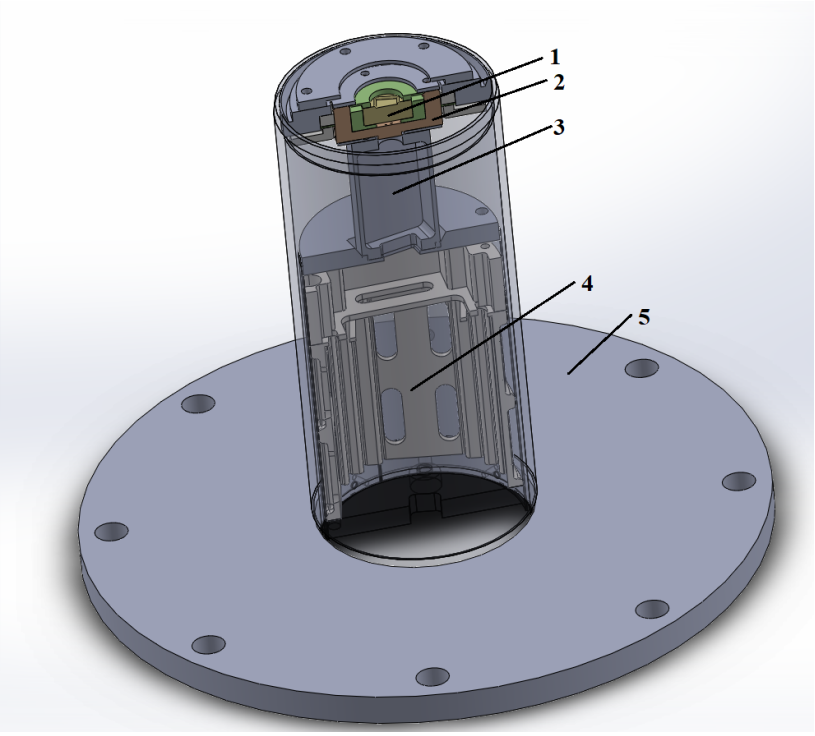


Рис. 1.

`

Рис. 2.

`



цифры - курсив

Рис. 3.

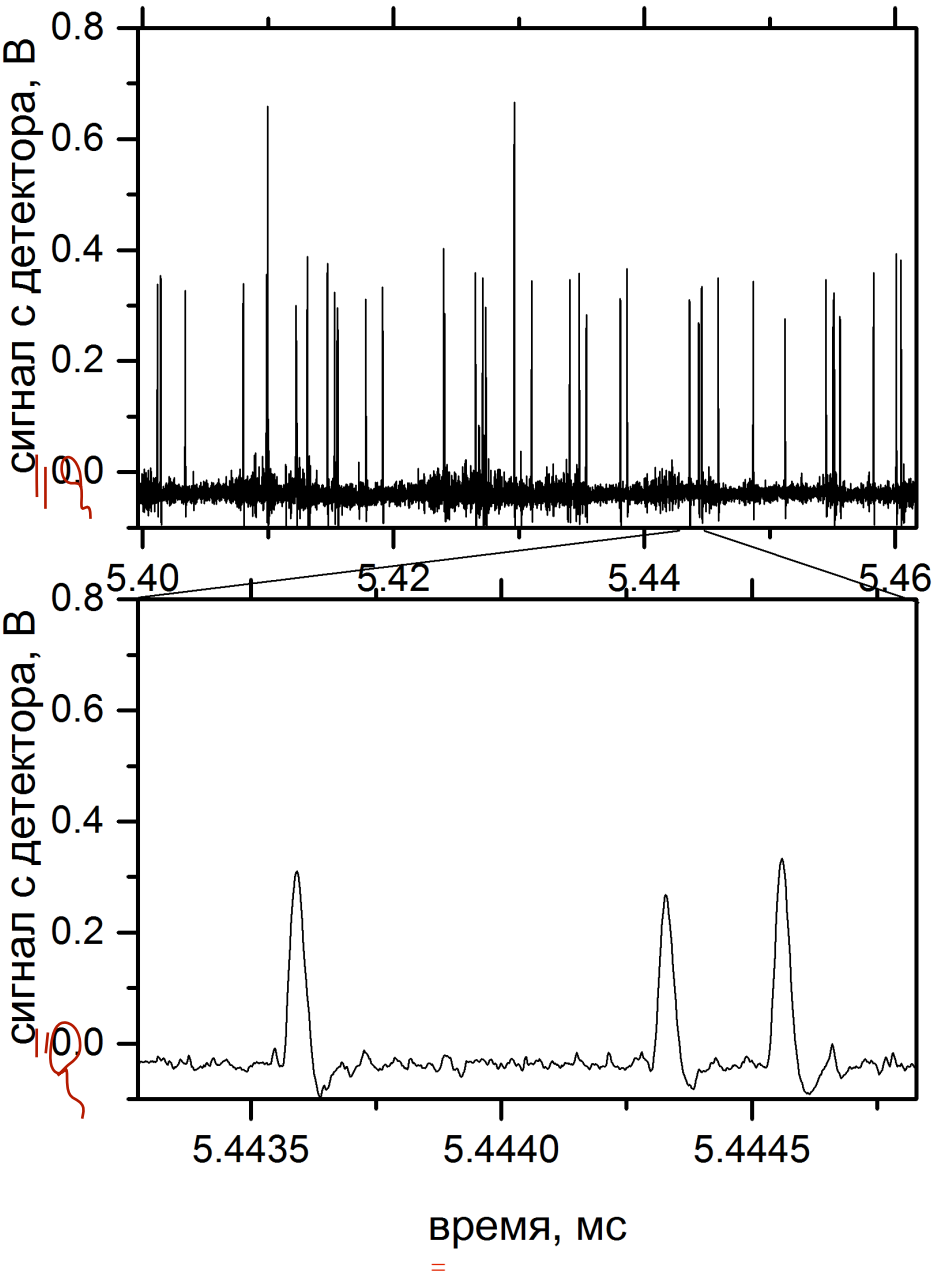

сигнал с детектора, В
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
5.40
5.42
5.44
5.46
сигнал с детектора, В
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
5.4435
5.4440
5.4445
время, мс

Рис. 4.

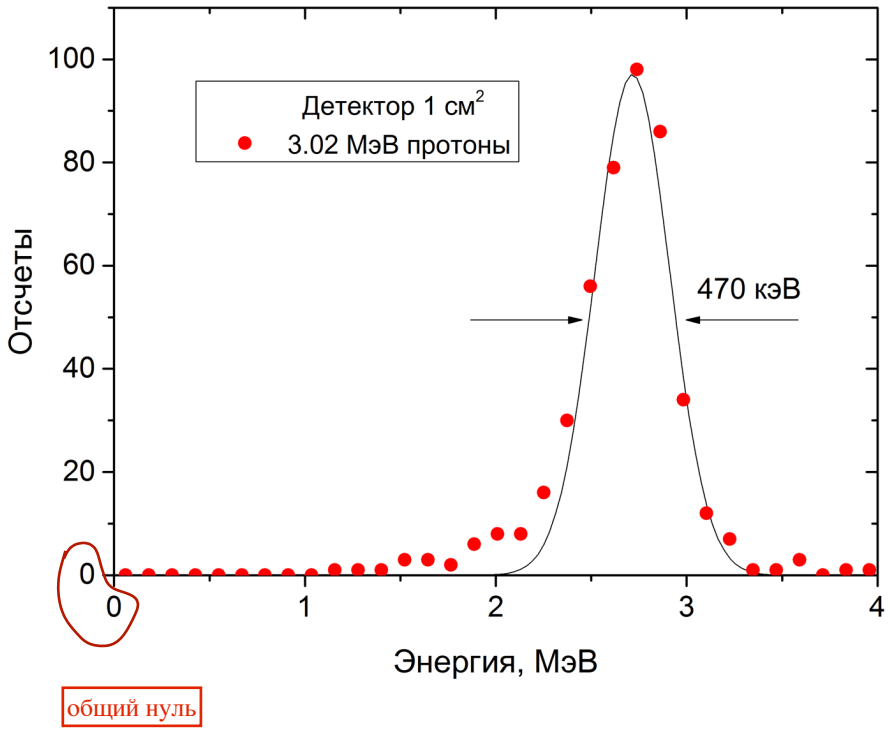

Детектор 1 см2
3.02 МэВ протоны
470 кэВ
Отсчеты
Энергия, МэВ
0
20
40
60
80
100
0
1
2
3
4
общий нуль

Рис. 5.

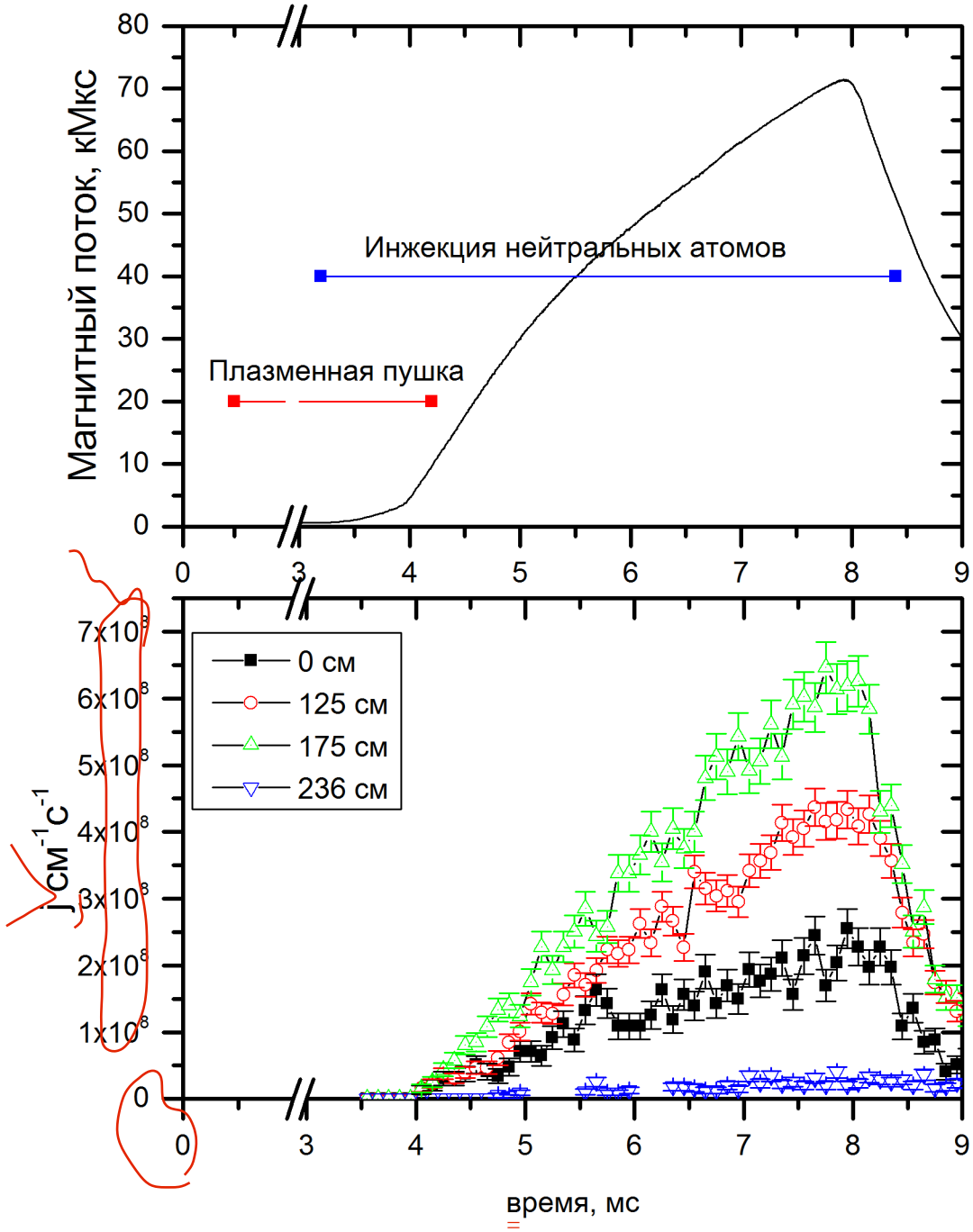

Магнитный поток, кМкс
Инжекция нейтральных атомов
Плазменная пушка
0 см
125 см
175 см
236 см
время, мс

Рис. 6.

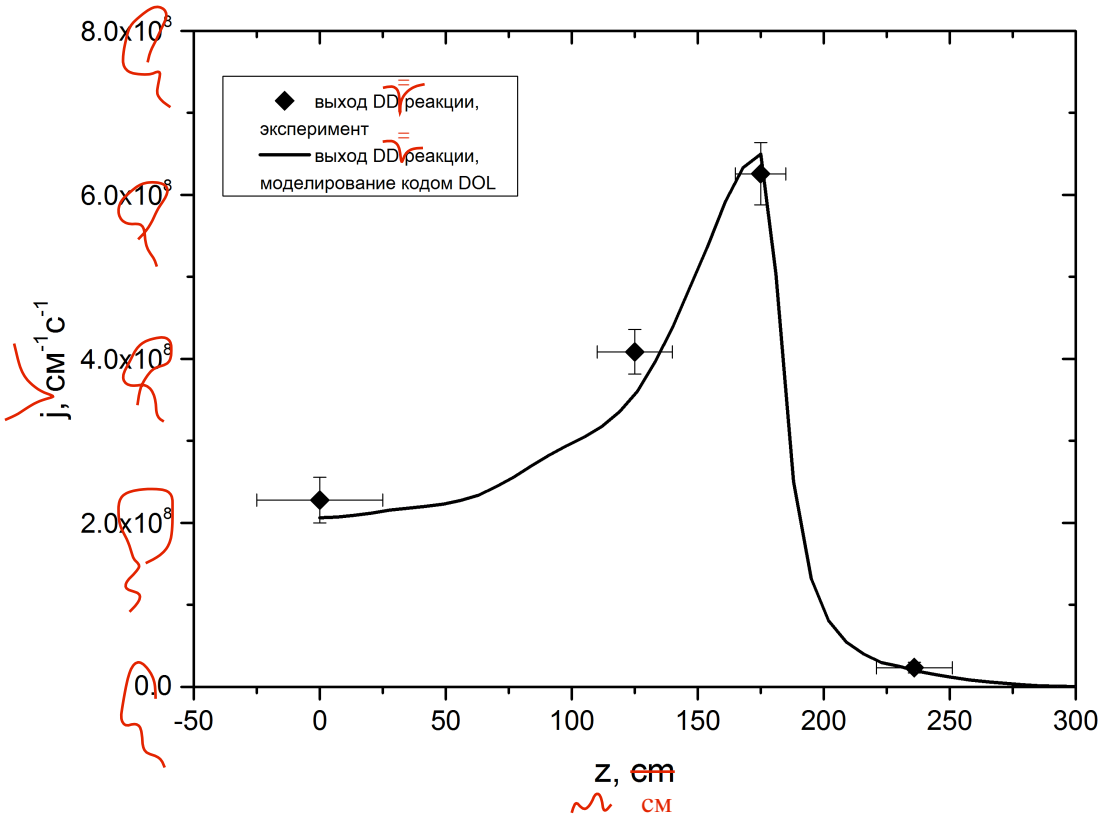

8.0x10^8
6.0x10^8
4.0x10^8
2.0x10^8
0.0
j, см^-1 с^-1
выход DD реакции, эксперимент
выход DD реакции, моделирование кодом DOL
-50
0
50
100
150
200
250
300
z, cm
см

Рис. 7.

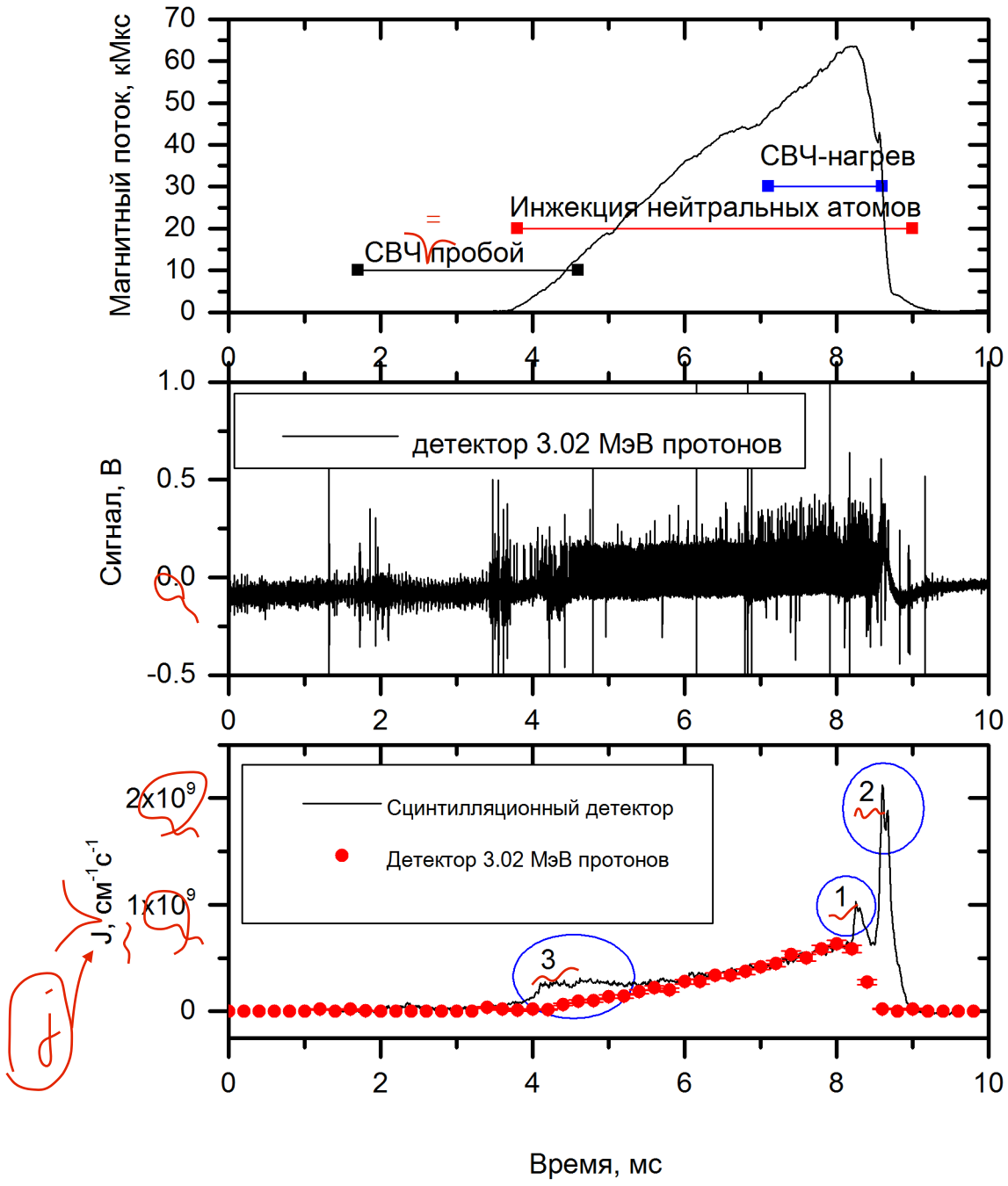

Магнитный поток, кМкс
70
60
50
40
30
20
10
0
СВЧ-нагрев
Инжекция нейтральных атомов
СВЧ пробой
0
2
4
6
8
10
Сигнал, В
1.0
0.5
0.0
-0.5
детектор 3.02 МэВ протонов
2x10^9
1x10^9
0
J, см^-1с^-1
Сцинтилляционный детектор
Детектор 3.02 МэВ протонов
1
2
3
Время, мс

Рис. 8.

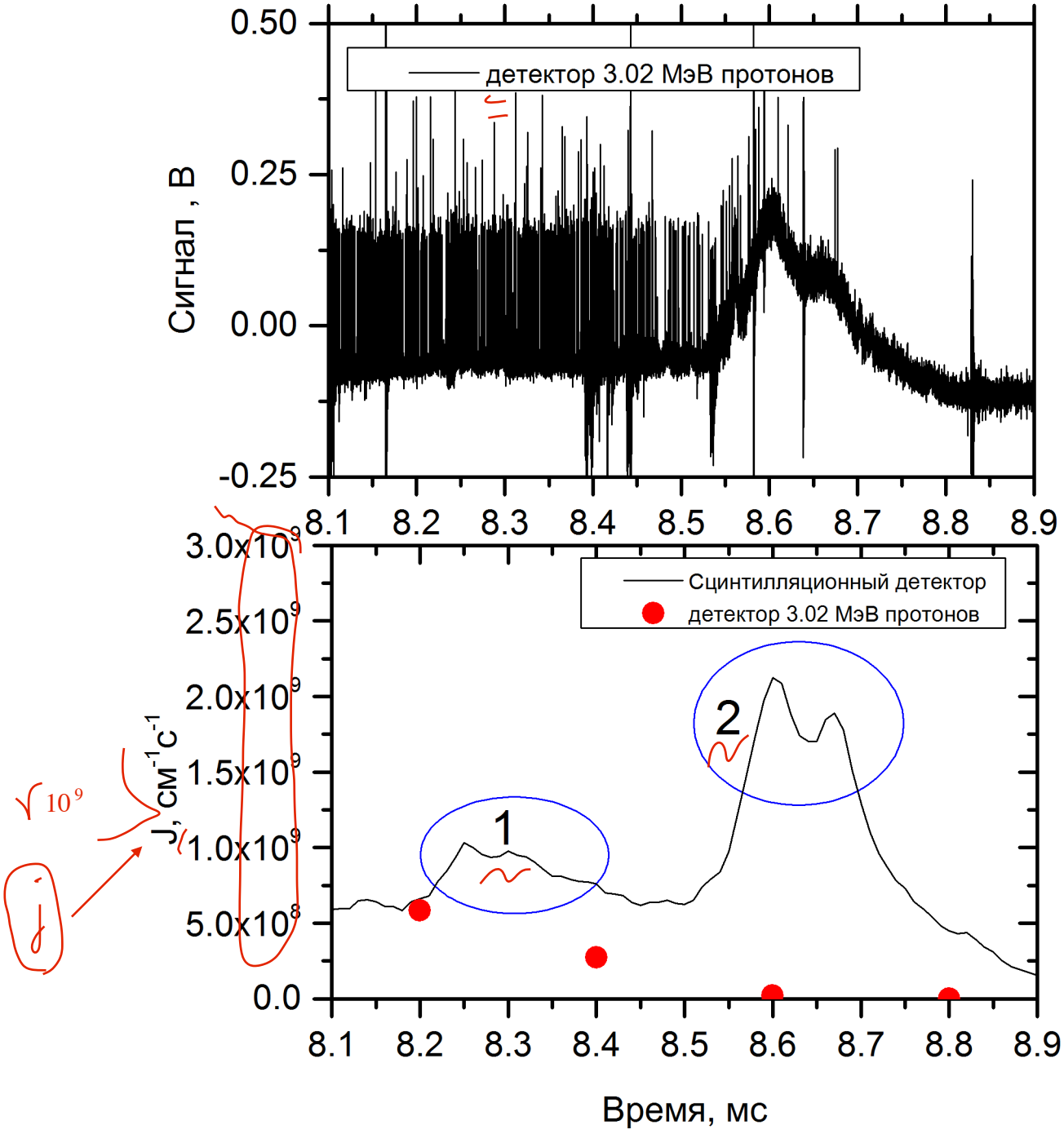
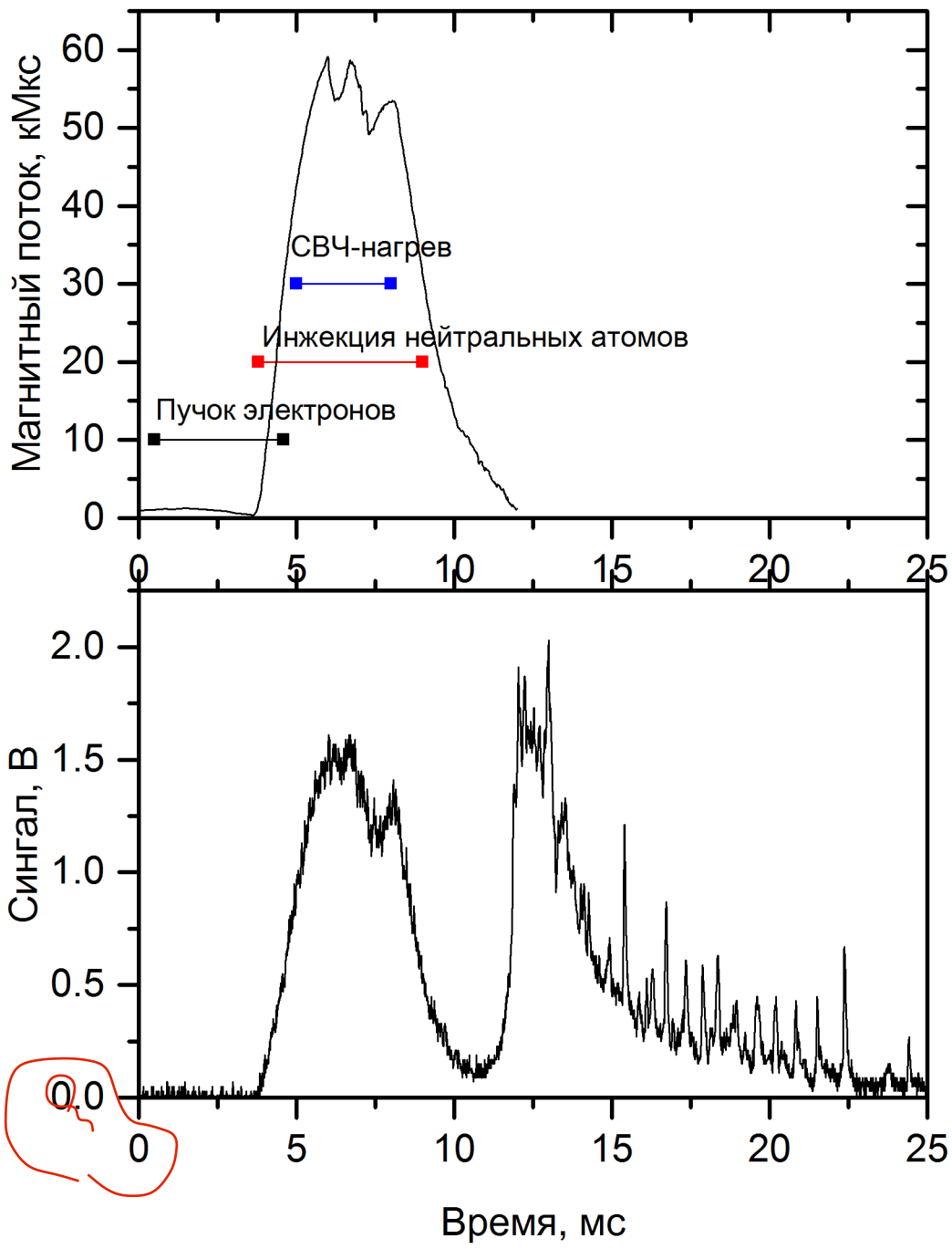

0.50
0.25
0.00
-0.25
Сигнал , В
детектор 3.02 МэВ протонов
8.1
8.2
8.3
8.4
8.5
8.6
8.7
8.8
8.9
3.0x10^9
2.5x10^9
2.0x10^9
1.5x10^9
1.0x10^9
5.0x10^8
0.0
J, см^-1 с^-1
Сцинтилляционный детектор
детектор 3.02 МэВ протонов
1
2
Время, мс

Рис.9.



общий нуль

Рис.10.

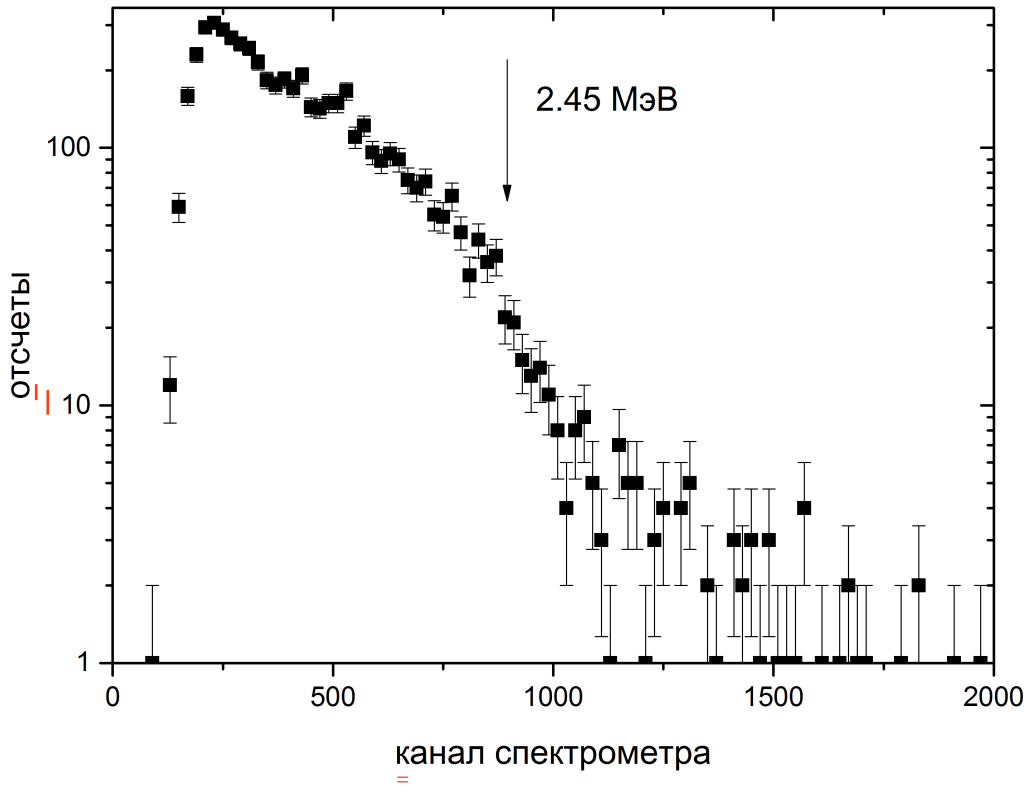

2.45 МэВ
100
10
1
отсчеты
0
500
1000
1500
2000
канал спектрометра

Рис. 11.

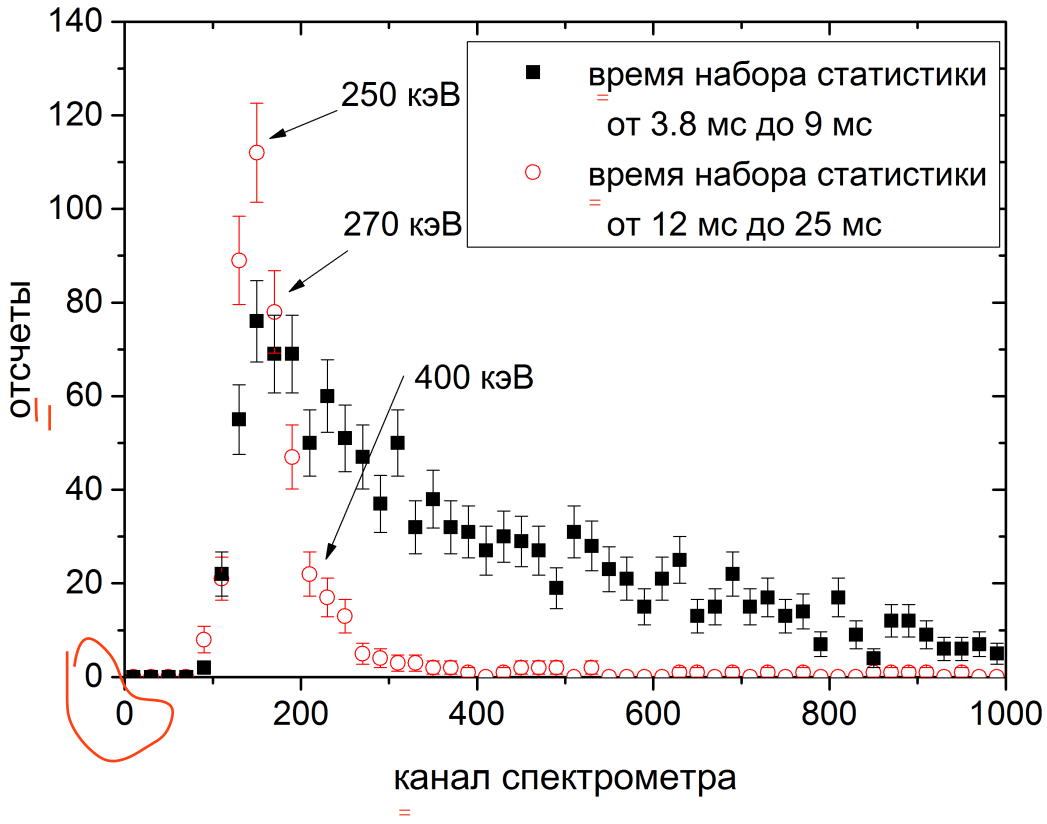

140
120
100
80
60
40
20
0
отсчеты
0
200
400
600
800
1000
канал спектрометра
250 кэВ
270 кэВ
400 кэВ
время набора статистики
от 3.8 мс до 9 мс
время набора статистики
от 12 мс до 25 мс

Рис. 12.

`

Для связи с авторами:

Пинженин Егор Игоревич
e-mail: e.i.pinzhenin@inp.nsk.su
Тел.: 8-913-774-53-62 (моб.)
Тел.: (383)329-42-24
Максимов Владимир Васильевич
e-mail: v.v.maximov@inp.nsk.su
Тел.: (383)329-49-64

Для переводчика:

Application of nuclear physics methods for plasma diagnostics at the GDL facility

Аннотация:
A diagnostic complex for detecting deuterium fusion products, as well as X-ray and gamma rays arising from the interaction of superheated electrons with structural elements and as a result of neutron capture by the nuclei of surrounding materials is described. The complex is used for plasma diagnostics at the Gas Dynamic Trap (GDT) facility. It consists of the following three subsystems. Diode based detectors of 3.02 MeV protons - products of dd-fusion are located inside the vacuum chamber of the GDT, operate in the counting mode, which allows absolute measurements of the flow of reaction products with a time resolution up to 100 μs. This system of detectors makes it possible to measure the spatial intensity profile of fusion reactions. Detectors based on the SPM-5 plastic scintillator and a photomultiplier tube (PMT) operate in the current mode and are designed to measure the intensity of neutron generation with a time resolution of up to 25 μs. These detectors are also sensitive to gamma rays and hard x-rays. Neutron and gamma ray spectrometer based on a stilbene scintillator and PMT makes it possible to separate particles of different types. The diagnostic complex makes it possible to carry out absolute measurements of the longitudinal profile of the neutron yield, to study the evolution of the intensity of the fusion reaction in experiments on plasma heating.