

Использование протонного пучка начальной части ускорителя ИСТРА-36 для физических исследований

А.М.Вишневский, А.А.Голубев, А.М.Козодаев, М.А.Козодаев,
Ю.Г.Орлов, А.Л.Суворов, А.Д.Фертман, Б.Ю.Шарков
ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия
М.И. Кулиш, В.Б. Минцев, В.Е. Фортов
Институт химической физики РАН, Черноголовка, Россия

Пучок сооружаемого в ИТЭФ протонного ускорителя ИСТРА-36 [1] будет использоваться для управления подкритическим бланкетом, наработки эмиттеров для позитронной томографии, производства коротко- и ультракороткоживущих радионуклидов медико-биологического и промышленного назначения, облучения материалов и изделий с целью изменения их свойств и испытания на радиационную стойкость, проведения физических исследований. Средний ток пучка составит 500 мкА, вывод частиц для прикладного использования будет возможен при энергиях 3, 10 и 36 МэВ. Ведется разработка мишенных станций, куда будет выводиться пучок с учетом особенностей конкретного вида облучения.

В настоящее время уже действует начальная часть ускорителя - секция RFQ с выходной энергией 3 МэВ [2]. Импульсный ток пучка на выходе канала RFQ составляет 50 мА, длительность импульсов 7 или 60 мкс, частота их повторения - не более 3 Гц. Средний ток пучка пока не превышает 5 мкА. Ведутся работы по изучению и оптимизации режима ускорения. Параллельно с этим пучок используется для экспериментальных исследований тормозных потерь протонов в плотной плазме и для облучения образцов твердого тела с целью последующего исследования радиационных эффектов на их поверхности.

В физике высоких плотностей энергии велик интерес к процессу взаимодействия тяжелых ионов с неидеальной плазмой при плотности свободных электронов 10^{19} см^{-3} и выше. Значительное увеличение энергетических потерь тяжелых ионов в плазме по сравнению с холодным веществом обусловлено их взаимодействием со свободными электронами плазмы и увеличением эффективного заряда ионов. Используя пучок протонов, эффективный заряд которых как в плазме, так и в газе равен единице, можно исследовать влияние только свободных электронов плазмы на энергетические потери пучка, определить возможность диагностирования плотности свободных электронов, оценить влияние "неидеальности" плазмы на энергетические потери.

Реально плазма является частично ионизированной и потери энергии зондирующих ее протонов dE_p/dx складываются из потерь на свободных и на связанных электронах [3]:

$$\frac{dE_p}{dx} = -\frac{4\pi e^4 n_{fe}}{m_e v_p^2} (L_{fe} + \sum_k \frac{n_k}{n_{fe}} v_{bk} L_{bk}).$$

Здесь: e и m_e - заряд и масса электрона, соответственно; n_{fe} - плотность свободных электронов; v_p - скорость протонов; L_{fe} - кулоновский логарифм для свободных электронов, в условиях нашего опыта равный ~ 10 . Второе слагаемое в скобках учитывает вклад связанных электронов: n_k - плотность ионов k ; v_{bk} - число связанных электронов иона k ; L_{bk} - кулоновский логарифм для связанных электронов. Взаимодействие протонов со связанными электронами вносит некоторую неопределенность в зависимость между dE_p/dx и n_{fe} , которая, однако, исчезает при значительной степени ионизации, о чем можно судить по температуре плазмы. В этом случае L_{fe} в 2-3 раза превышает значение L_{bk} .

Для экспериментального измерения потерь энергии пучка на выходе ускорителя были смонтированы устройства, схема и общий вид которых представлены на рис.1. Протонный пучок с энергией 3 МэВ и длительностью импульсов 7 мкс сепарировался по энергии с

помощью поворотного магнита и размещенных в специальной камере на его выходе вертикальной щели шириной 1 мм и выходного отверстия диаметром 1 мм.

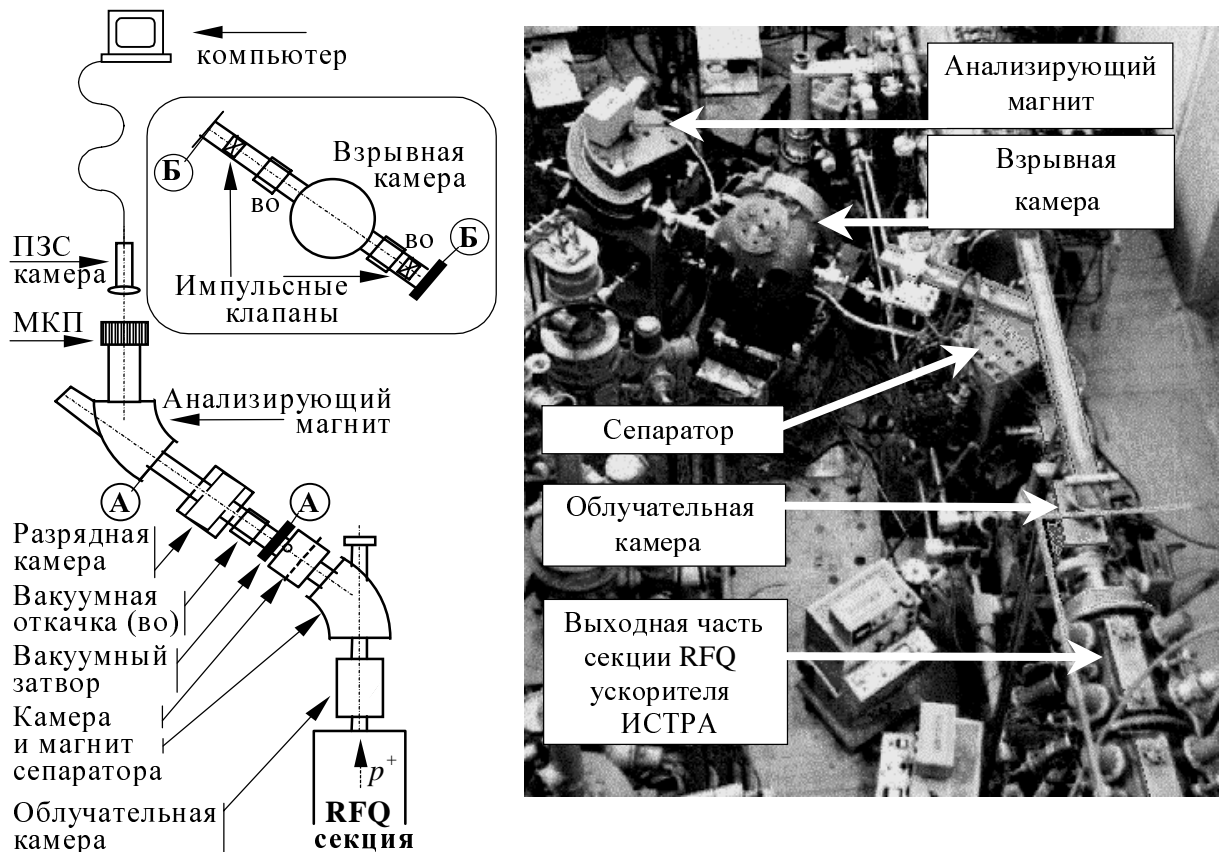


Рис.1. Схема (слева) и общий вид (вверху) экспериментальных устройств на выходе RFQ-секции ускорителя.

Малые размеры щели и отверстия одновременно способствовали вакуумной развязке и поддержанию перепада давления между высоковакуумным ($\sim 10^{-6}$ Торр) объемом ускорителя и разрядной камерой. Разброс частиц по импульсам на выходе камеры сепаратора составлял $\pm 0,1\%$. Работа велась одноразовыми посылками пучка. В разрядной камере была установлена плазменная мишень на основе полиэтиленового (СН₂) капилляра с испаряемой стенкой. Длина капилляра - 50 мм, внутренний диаметр - 1,5 или 3 мм. Продольная ось капилляра с помощью лазерной технологии совмещалась с осью продольного движения пучка. Разряд, в течение которого расходовалась энергия 150 Дж при токе 10 кА за время 10 мкс, происходил между графитовыми электродами, размещенными на торцах капилляра. Яркостная температура плазмы, определенная в области длин волн 200-300 нм по стандартному источнику яркости КРИС с температурой 4 эВ, составляла 3,6-3,7 эВ. Давление плазмы по тарированному пьезодатчику равнялось 200-700 атм.

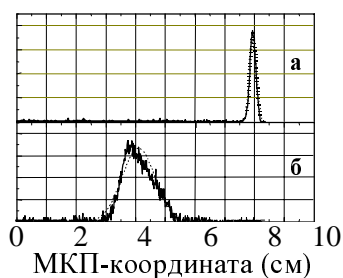


Рис.2. Сигнал на МКП.

Измерение энергии протонного пучка, прошедшего через плазму в разрядной камере, осуществлялось с помощью анализирующего магнита, микроканальной пластины МКП и располагавшейся за ней волоконно-оптической шайбы с напыленным люминофором. Изображение яркостного следа протонного пучка, полученное на экране МКП, регистрировалось видеокамерой на основе ПЗС-матрицы и обрабатывалось компьютером. Калибровка измерительного тракта производилась пучком с энергией 3 МэВ. На рис.2 приведено распределение плотности пучка на МКП в горизонтальном направлении в отсутствии плазмы (а) и при ее наличии (б). Перемещение пика в сторону меньших энергий (б) вызвано энергетическими потерями пучка в плазме, расширение импульса — следствие воздействия поля разрядного тока на протонный поток.

В экспериментах получены данные по энергетическим потерям протонов и температуре плазмы, на базе которых с привлечением специальной методики определена плотность свободных электронов исследовавшейся углеродно-водородной плазмы. Полученные значения n_{fe} хорошо согласуются с опытными данными по измерению давления. Результаты приводятся ниже.

Диаметр капилляра (мм)	Максимальные потери энергии протонов в плазме (кэВ)	Плотность свободных электронов ($см^{-3}$)
3	170 ± 5	$(2,6 \pm 0,5) \cdot 10^{19}$
1,5	495 ± 15	$(6,4 \pm 1,5) \cdot 10^{19}$

Для генерирования плазмы с плотностью $n_{fe} \geq 10^{20} см^{-3}$ был подготовлен и опробован линейный кумулятивный взрывной генератор с общим весом взрывчатого вещества до 60 г, позволяющий получать скорость ударной волны 5–15 км/с в исследуемом газе – ксеноне при начальном давлении 0,05–0,2 бар. Для исследования плазмы, получаемой взрывом, участок А-А на схеме рис.1 был заменен участком Б-Б. Защита высоковакуумного объема ускорителя от попадания избыточного давления и продуктов горения из взрывной камеры осуществлялась с помощью импульсных клапанов, закрывающихся до прихода к ним продуктов взрыва. Ускоритель работал с длительностью импульсов 60 мкс и частотой их повторения 0,25 Гц, взрывной генератор — в режиме единичных срабатываний. Импульсные клапаны получали команду на старт за 13 мс до появления пучка, взрывной генератор срабатывал от факта реального появления переднего фронта пучка на выходе ускорителя. Плазма “надвигалась” на пучок через 12 мкс после его начала. На рис.3 показан сигнал на МКП. Исходная энергия протонов $E_p = 2,92$ МэВ меньше 3 МэВ из-за потерь на холодном ксеноне. Слабо выраженный пик при $E_p = 2,77$ МэВ относится к пучку, прошедшему через плазму.

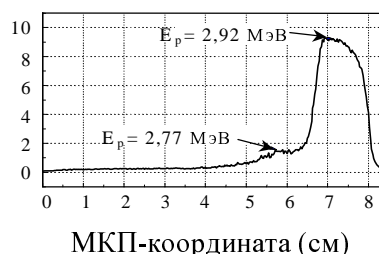


Рис.3. Сигнал на МКП при взрывном методе.

При каждом взрыве измерялись скорость ударной волны и яркостная температура плазменного сгустка. Оцененные по измеренным величинам в рамках дебаевского приближения в большом каноническом ансамбле параметры плазмы в условиях экспериментов составили: давление 150–1000 бар, электронная концентрация $10^{19} - 10^{20} см^{-3}$, параметр неидеальности 0,2 – 0,5. Измеренные потери энергии протонов в зависимости от параметров плазмы составляли 100–400 кэВ. Проведенные эксперименты показали работоспособность комплексной установки ускоритель – взрывной генератор для получения и исследования плазмы с $n_{fe} \geq 10^{20} см^{-3}$. Однако для дальнейшего продвижения необходимо совершенствование генерирования плазмы и диагностики пучка, а также увеличение его энергии.

К физике поверхности твердого тела относится другое направление исследований и касается изучения радиационных дефектов на поверхности высокоориентированного пиролиитического графита (ВОПГ). Интерес к радиационной стойкости ВОПГ обусловлен его быстрым распространением и перспективой расширения дальнейшего использования как конструкционного, вакуумноплотного и термостойкого материала, работающего при высоких уровнях радиации. ВОПГ находит применение в космической технике, энергетике, реакторостроении, электрофизических установках. Исследователей интересует поведение ВОПГ при его облучении ионами в диапазоне энергий от 1 кэВ до 5 МэВ при дозах 10^{12} - 10^{18} ионов/см².

Образцы графита представляли собой пластины размерами 10×10 мм² и толщиной 2 мм, помещались в вакуум облучательной камеры (рис.1) и бомбардировались потоками протонов с энергией 3 МэВ (нормально к поверхности) и 90 кэВ (нормально и под углом 45°) при флюенсах 10^{14} протон/см². Ускоритель работал с длительностью импульсов пучка 60 мкс и частотой их повторения 0,5 Гц. Протоны с энергией 90 кэВ поступали от инжектора и проходили через канал RFQ длиной 4,5 м без ВЧ-поля в нем, поэтому импульсный ток пучка в облучательной камере не превышал 1 мА. Для получения истинной формы импульса протонного тока (рис. 4-в) по сигналам с индукционного датчика (ИД) при столь малой величине тока и наличии интенсивных помех использован способ вычитания сигнала помех (б) из суммарного сигнала (а). Время облучения при энергии 3 МэВ составляло 3 мин 20 с, при $E_p=90$ кэВ – 3 часа.

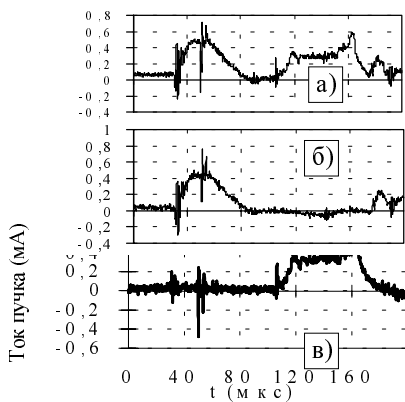


Рис.4. Сигналы с ИД.

Заключение

1. Протонным пучком с энергией 3 МэВ тестирована плазма с плотностью свободных электронов $n_{fe} = (2,6-6,4) \cdot 10^{19}$ см⁻³.
2. Подтверждена возможность зондирования пучком ускорителя плазмы, получаемой взрывным способом, с плотностью свободных электронов $n_{fe} \geq 10^{20}$ см⁻³.
3. Образцы пиролиитического графита облучены протонами с энергией 90 кэВ и 3 МэВ, на СТМ-микроскопе получены визуальные изображения радиационных дефектов.

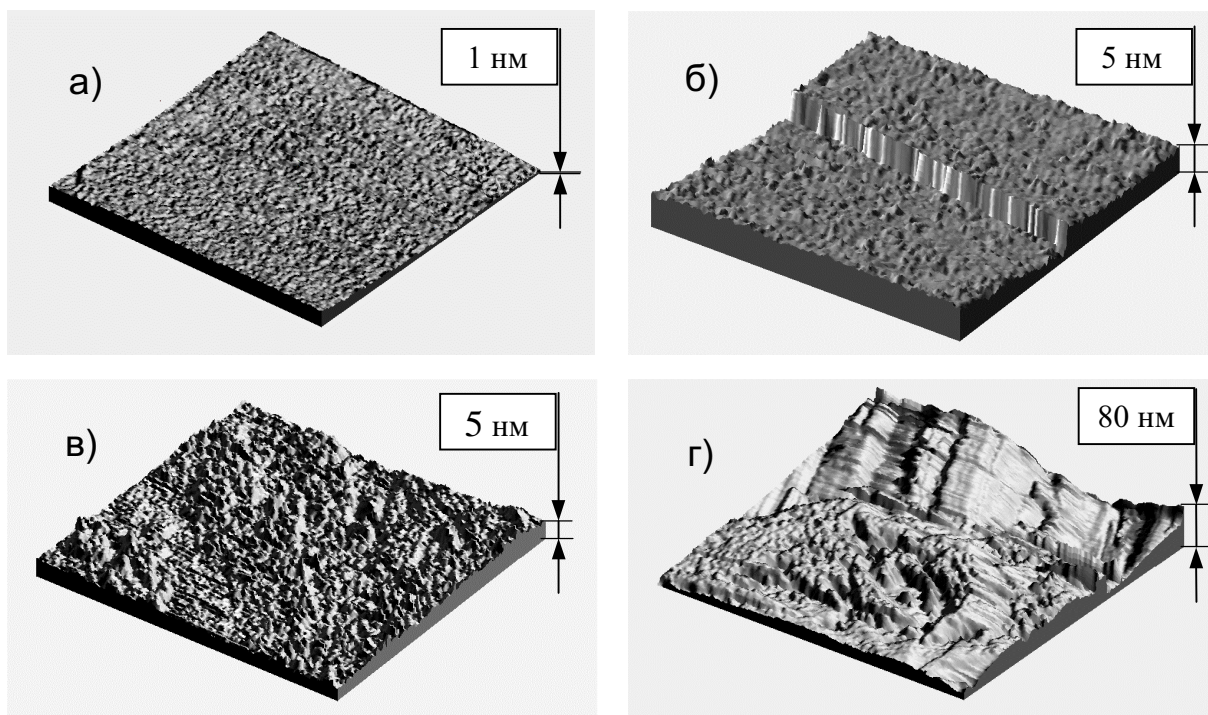


Рис.5. СТМ-сканы поверхностей образцов пиролитического графита:
а) необлученный образец; б) $E_p = 3 \text{ МэВ}$; в) $E_p = 90 \text{ кэВ}$, $\angle 45^\circ$; г) $E_p = 90 \text{ кэВ}$, $\angle 90^\circ$.

Литература

- [1] Chuvilo I.V. et al. Proc. of the EPAC-96. Spain, 10-14 June 1996, v.3, p.2674.
- [2] Артемов В.С. и др. *Подготовка и физический пуск протонного ускорителя...* Настоящее совещание.
- [3] Golubev A. et al. "Phys. Rev. E", March 1998, v.57, N3, p.3363.
- [4] Suvorov A.L. et al. 45 Intern. Field Emis. Sympos., Jordan, 12-18 Sept. 1998. Program and Abstracts, p.144.