

Импульсный лазерно-плазменный источник электронов с нанокластерной мишенью

Н.А. Кузечкин
НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, Россия
lents125@mail.ru

А.А. Ангелуц
НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, Россия
angeluts@physics.msu.ru

А.В. Балакин
МГУ им. М.В. Ломоносова
Москва, Россия
a.v.balakin@physics.msu.ru

П.М. Солянкин
НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, Россия
soluankp@yandex.ru

А.П. Шкуринов
МГУ им. М.В. Ломоносова
Москва, Россия
ashkurinov@physics.msu.ru

Аннотация— Представлены результаты работ по исследованию возможности создания компактного лазерно-плазменного источника электронов с использованием субтераваттной лазерной системы накачки и нанокластерной мишени.

Ключевые слова— лазерное ускорение частиц, сверхкороткие лазерные импульсы, нанокластеры, лазерная плазма

I. ВВЕДЕНИЕ

Генерация и ускорение электронных пучков в лазерно-индуцированной плазме – обширная область исследований, которой посвящено множество экспериментальных и теоретических работ [1]–[4]. Энергия электронного пучка может достигать вплоть до 7.8 ГэВ [2]. В качестве мишени для лазерного излучения применяются как газовые, так и конденсированные среды. Представляют значительный интерес неоднородные по структуре мишени, применение которых позволяет объединить преимущества газовых и конденсированных. К такому типу мишеней относятся газопо-кластерные пучки. Формирование пучка происходит при адиабатическом расширении газа высокого давления через сопло специальной формы в вакуум. При этом образуются агрегации частиц – кластеры, диаметр которых имеет масштаб от нанометрового до субмикронного. Размер кластеров и их концентрацию в струе можно легко регулировать путем изменения давления газа, поступающего в сопло. Была показана высокая эффективность подобной мишени с точки зрения заряда генерируемого электронного пучка [3] и его энергии [4]. Физическими механизмами ускорения электронов могут являться DLA (прямое лазерное ускорение) и SM-LWFA (ускорение в кильватерной волне с самомодуляцией импульса). При этом в качестве источника излучения при работе с кластерными мишенями достаточно эффективно могут быть использованы настольные фемтосекундные лазерные системы.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Расположение основных элементов экспериментального стенда представлено на рис. 1. Установка включала в себя источник излучения накачки, систему формирования газопо-кластерного пучка и измерительное оборудование. Источником возбуждающего излучения являлась фемтосекундная лазерная система Coherent Astrella. Параметры

возбуждающего лазерного излучения следующие: длительность импульса 35 фс, максимальная энергия импульса 6 мДж, центральная длина волны 802 нм. Вакуумная интенсивность сфокусированного на мишень излучения составляет $1.9 \cdot 10^{17}$ Вт/см².

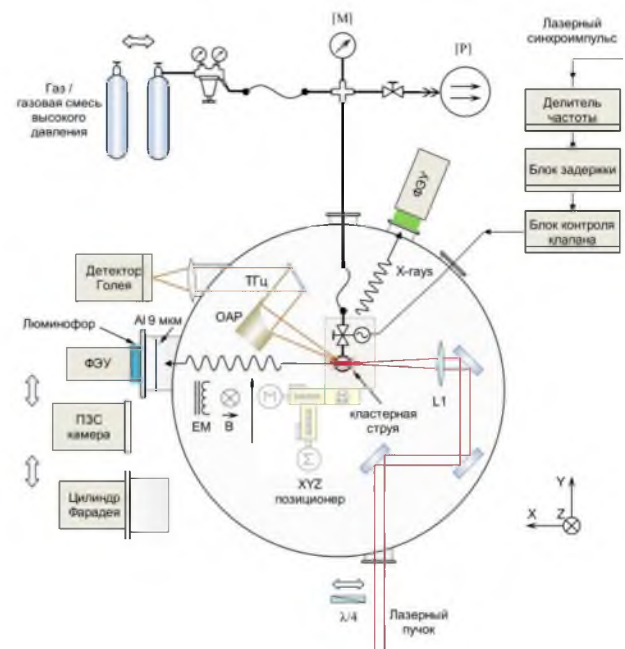


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Для измерения параметров электронного пучка применялись два типа детекторов. Первый – сцинтилляционный экран Kodak Lanex Regular. Измерение двумерного распределения интенсивности свечения экрана осуществлялось с помощью высокочувствительной ПЗС-камеры. Для блокировки оптического излучения возбуждающего лазера применялся фильтр из алюминиевой фольги толщиной 9 мкм. Измерение интегральной светимости сцинтилляционного экрана производилось с помощью ФЭУ. Для определения средней энергии электронного пучка применялся магнитный спектрометр. Для измерения общего электрического заряда электронного импульса применялся детектор Фарадея. Помимо параметров электронного пучка, установка позволяла осуществлять измерение энергий ТГц и рентгеновского импульсов, генерируемых в кластеризованной плазме и сопутствующих процессу формирования электронного пучка. Результаты данных измерений дают возможность

получить дополнительную информацию о процессе лазерно-кластерного взаимодействия.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Нами было проведено исследование влияния параметров кластерной мишени и лазерного излучения на эффективность генерации электронных импульсов. В качестве рабочего вещества газовой-кластерной струи испытывались следующие газы и газовые смеси: Ar, CO₂, He, SF₆, (SF₆+Ar), (CO₂+He). На рис. 2 представлено сравнение сигнала интегрального сцинтилляционного детектора электронов для различных газов и газовых смесей. Величина сигнала определяется энергией и зарядом электронного импульса.

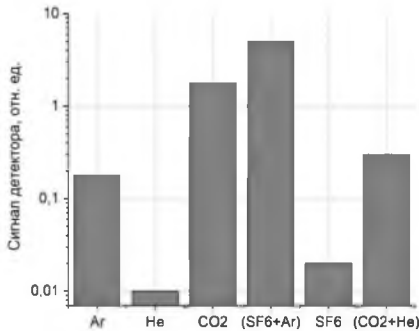


Рис. 2. Сигнал интегрального детектора электронов в зависимости от типа газа/газовой смеси.

Наибольшая эффективность генерации наблюдалась при использовании смеси SF₆+Ar в молярном соотношении (1:8). Отметим, что в данной мишени кластеры имеют наиболее крупный размер из представленных (около 40 нм). В гелиевой струе не образуются кластеры. На рис. 3 представлены результаты измерения зависимости сигнала детектора электронов от давления газа, создающего кластерный пучок.

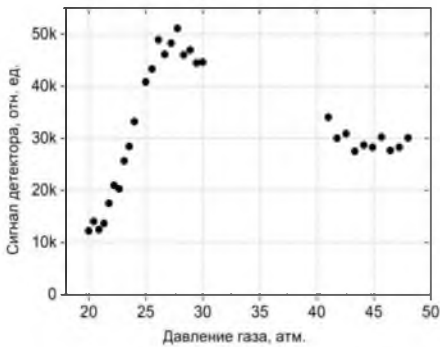


Рис. 3. Сигнал детектора электронов в зависимости от давления рабочего газа.

Как можно видеть, наблюдается рост, но зависимость имеет максимум, за которым следует спад. При увеличении давления размер кластера возрастает. Однако при слишком больших давлениях увеличивается остаточное давление в вакуумной камере, что приводит к рассеянию электронного пучка, с чем мы связываем данный спад. На рис. 4 представлен результат

исследования влияния длительности возбуждающего импульса на эффективность работы источника. Оптимальное значение длительности, при котором сигнал достигает максимальной величины, находится в области 70-80 фс, а знак чирпа при этом отрицательный. Отметим, что отрицательное чирпирование компенсирует нормальную дисперсию среды при прохождении лазерного излучения через атмосферный воздух и оптические элементы схемы до прихода излучения к кластерной мишени, обеспечивая таким образом минимальную длительность импульса и наибольшую интенсивность возбуждающего излучения.

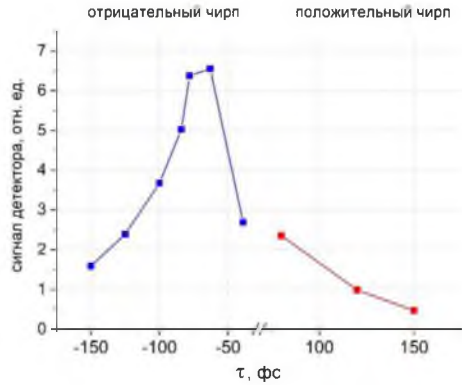


Рис. 4. Зависимость амплитуды сигнала интегрального детектора электронов от длительности и знака чирпа лазерного импульса.

ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ

В таблице I приведены основные параметры электронного пучка при оптимальных условиях возбуждения.

Таблица I. ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ

Параметр	Значение
Средняя энергия электронов	90 кэВ
Угол расходимости пучка	90 мрад
Поперечный эмиттанс пучка	1.3...6.3 мм·мрад
Общий заряд импульса	85 фКл
Частота повторения импульсов	10 Гц

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено частично в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова и в рамках государственного задания НИЦ "Курчатовский институт"

ЛИТЕРАТУРА

[1] Hooker, S.M. Developments in laser-driven plasma accelerators / S.M. Hooker // Nature Photonics. – 2013. – Vol. 7. – P. 775.
[2] Hafz, N.A.M. Stable generation of GeV-class electron beams from self-guided laser-plasma channels / N.A.M. Hafz // Nature Photonics. – 2008. – Vol. 2. – P. 571.
[3] Mirzaie, M. Laser acceleration in argon clusters and gas / M. Mirzaie // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2016. – Vol. 58. – P. 034014.
[4] Zhang, L. Electron acceleration via high contrast laser interaction with submicron clusters / L. Zhang // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 100. – P. 014104.