

# Ускорение электронов в пустотелых стеклянных капиллярах под действием высокоинтенсивных пикосекундных лазерных импульсов

В.А.Флегентов, К.В.Сафронов, Д.С.Гаврилов, А.Г.Какшин, Н.А.Пхайко, А.В.Потапов

*На пикосекундной лазерной установке исследована генерация релятивистских электронных пучков в пустотелых стеклянных капиллярах. Плазменная среда внутри капилляра формировалась в результате абляции его внутренних стенок под действием специально сформированного предимпульса. В экспериментах зарегистрированы пучки электронов с углом раствора  $\sim 40$  мрад, экспоненциальным энергетическим спектром с максимальной энергией около 20 МэВ и суммарным зарядом в пучке  $\sim 0.2$  нКл.*

**Ключевые слова:** пикосекундный лазерный импульс, предимпульс, пустотелый капилляр, релятивистские электроны, электронный магнитный спектрометр.

## 1. Введение

Источники тормозного рентгеновского излучения на основе лазерно-плазменных ускорителей электронов обладают привлекательными временными (единицы пикосекунд) и пространственными (сотни микрометров) характеристиками [1, 2] для научных, промышленных и медицинских целей. Однако небольшие дозы, создаваемые такими источниками, в настоящее время ограничивают перспективы их применения.

Для увеличения дозы излучения на облучаемом объекте необходимо повышать число ускоряемых в лазерной плазме электронов, а также уменьшать угловую расходимость генерируемых пучков [3]. Перспективным для этой цели является лазерно-плазменное ускорение в капиллярных мишенях [4]. Капиллярные мишени позволяют формировать осесимметричную плазму с радиальным профилем плотности, что при определенных условиях может способствовать прохождению лазерного импульса через плазму и сосредоточению электронов к оси. Для формирования ускорительной среды внутри капилляра его обычно предварительно заполняют газом через специально просверленные каналы [5, 6] либо наполняют газом всю мишенную камеру [7]. Первый метод сложен для реализации с точки зрения конструкции мишени. Недостаток второго метода заключается в том, что газовая среда между фокусирующим объективом и мишенью может приводить к самофокусировке мощного лазерного излучения еще до входа в капилляр и поэтому препятствовать эффективной транспортировке энергии внутрь него. В частности, этим эффектом может объясняться малый заряд электронных пучков (около 1 пКл) в работе [7]. В работе [8] сообщается о более простом способе формирования ускоряющей среды – за счет абляции внутренних

стенок полого конуса из золота, закрепленного перед входным торцом капилляра. В этой работе продемонстрирована генерация пучка электронов с энергиями до 100 МэВ, авторы оценили полный заряд на уровне 13 нКл (в предположении, что угловой раствор электронного пучка равен углу схождения лазерного излучения от фокусирующего объектива к мишени).

В настоящей статье мы сообщаем об успешном применении еще более простой конструкции капиллярной мишени – без конической насадки на входе. Ускоряющая среда формировалась при облучении внутренних стенок самого капилляра специально сгенерированным предимпульсом пикосекундной длительности. В экспериментах зарегистрированы коллимированные пучки электронов с энергиями до 22 МэВ при суммарном заряде частиц до  $\sim 0.2$  нКл.

## 2. Постановка экспериментов

Эксперименты проведены на пикосекундной лазерной Nd:glass-установке с центральной длиной волны излучения  $\lambda = 1054$  нм, длительностью импульсов  $\tau = 0.8 - 1$  пс и энергией до 15 Дж. Пучок диаметром  $D = 120$  мм концентрировался в плоскости входного торца капиллярных мишеней при помощи внеосевого параболического зеркала (ВПЗ) с фокусным расстоянием  $F = 200$  мм ( $F/D = 1.7$ ). В приближении гауссовой оптики диаметр перетяжки в фокусе  $d = 4\lambda/\pi(F/D) \approx 2$  мкм (по уровню  $1/e^2$ ), длина Рэлея  $L_R = \pi d^2/(4\lambda) = 3.5$  мкм. В этих условиях плотность мощности излучения в перетяжке составляла  $(2-4) \times 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>.

**Формирование лазерных предимпульсов.** Для ускорения электронов пустотелый капилляр предварительно заполнялся абляционной плазмой, создаваемой ультракоротким предимпульсом. Предимпульс формировался до ввода пучка в основной усилительный тракт по схеме, представленной на рис.1. Регулировка его амплитуды осуществлялась установкой светоделителей с коэффициентами отражения, которые обеспечивали отношения энергий основного импульса к предимпульсу 10:1, 100:1 или 1000:1. Вплоть до мишени предимпульс следовал по тому же оптическому пути, что и основной импульс.

В.А.Флегентов, К.В.Сафронов, Д.С.Гаврилов, А.Г.Какшин, Н.А.Пхайко, А.В.Потапов. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. Е.И.Забаякина», Россия, Челябинская обл., 456770 Снежинск, ул. Васильева, 13; e-mail:dep5@vniitf.ru, avp65gr@rambler.ru

Поступила в редакцию 13 июля 2021 г.

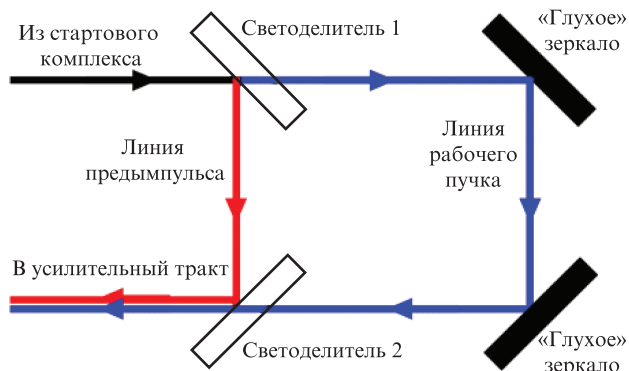


Рис.1. Принципиальная схема формирования предимпульса.

Задержка прихода основного импульса на мишень была фиксированной и составляла 1.4 нс.

**Мишенный узел.** Капиллярные мишени изготавливались из боросиликатного стекла марки С89-1 ( $\text{SiO}_2 - 72.0\%$ ) и представляли собой полые трубки с внутренними диаметрами  $w$ , равными 50, 100 и 140 мкм. Толщина стенок капилляров равнялась диаметрам каналов, длина  $l$  составляла от 2 до 10 мм. Для всех изготовленных мишеней соотношение  $(l/w)^2$  более чем в 70 раз превышала  $(FD)^2$  фокусирующей параболы; таким образом, доля энергии предимпульса, попадающая на внутренние стенки капилляра, составляла не менее 98%.

Перед экспериментами ось капилляра тщательно совмещалась с осью лазерного пучка при помощи мишенного узла с пятью степенями свободы. Он обеспечивал линейное перемещение мишени в трех ортогональных пространственных направлениях, а также вращение вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Фокусировка лазерного излучения производилась в плоскости торца капилляра с точностью  $\pm 10$  мкм, поперечное отклонение перетяжки пучка от центра канала не превышало 5 мкм, угол между осями пучка и капилляра составлял не более 1 и 5 мрад для мишеней длиной 10 и 2 мм соответственно.

**Измерение характеристик пучков ускоренных электронов.** Схема экспериментов представлена на рис.2. Энергетический спектр ускоренных электронов измерялся магнитным спектрометром на основе плоскопараллельных постоянных NdFeB-магнитов. Спектрометр был размещен на расстоянии 250 мм от мишени. Схема конструкции спектрометра представлена на рис.3. В качестве детектора электронов применялся гибкий фотолюминесцентный экран Image Plate (IP BAS-MS), установленный в

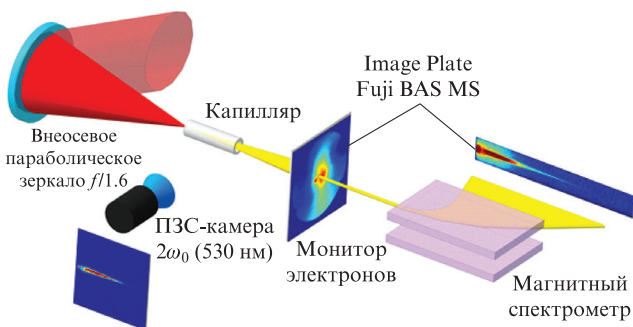


Рис.2. Схема экспериментов по лазерно-плазменному ускорению электронов из пустотелых стеклянных капилляров.

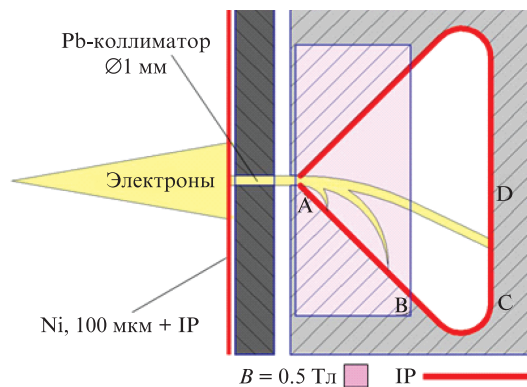


Рис.3. Схема конструкции магнитного спектрометра электронов.

положение, показанное на рис.3. Электроны с энергиями от 0.9 до 4.5 МэВ, прошедшие через входную диафрагму  $\varnothing 1$  мм, фокусировались вблизи поверхности детектора на участке АВ. На этом участке энергетическое разрешение спектрометра определялось пространственным разрешением детектора ( $\sim 100$  мкм) и составляло менее 1%. На участке CD регистрировались электроны с энергиями свыше 7 МэВ. Энергетическое разрешение спектрометра на этом участке определялось диаметром входной диафрагмы и для электронов с энергиями 25 МэВ составляло  $\sim 7\%$ . Чувствительность IP к электронам с энергиями более 1 МэВ была определена в работах [9–11] и почти не зависела от энергии электронов.

Для определения углового раствора пучка электронов на переднюю поверхность магнитного спектрометра был прикреплен экран IP диаметром 140 мм, имеющий отверстие напротив входной диафрагмы (см. рис.2 и 3). Размер экрана в указанной геометрии регистрации соответствовал углу обзора  $\sim 30^\circ$ . Для защиты от лазерного и низкоэнергетического рентгеновского излучения передняя поверхность IP пленки была закрыта фольгой из Ni толщиной 100 мкм.

Интегральное по времени свечение области взаимодействия лазерного импульса с капиллярными мишенями регистрировалось боковой 8-битной ПЗС-камерой (см. рис.2) в окрестности длин волн второй гармоники основного лазерного излучения (527 нм). Пространственное разрешение системы регистрации составляло 12 мкм.

### 3. Результаты экспериментов

**Заполнение капилляра абляционной плазмой.** Формирование абляционной плазмы внутри капилляров исследовано на одиночных пикосекундных импульсах. Энергии импульсов в экспериментах составляли 9 мДж, 90 мДж и 1.25 Дж, что приблизительно соответствует заданным уровням предимпульсов по отношению к основному излучению с энергией  $\sim 10$  Дж. Внутренний диаметр капилляров в этих экспериментах составлял 50 мкм, длина  $l = 10$  мм. На рис.4 представлены полученные при помощи боковой ПЗС-камеры изображения свечения плазмы внутри капилляров. Лазерный импульс на изображениях распространяется слева направо. Белыми линиями обозначен внешний контур капилляров, построенный по изображениям, полученным перед облучением.

Внутри капилляров наблюдается протяженная область светящейся плазмы, длина которой меняется в зави-

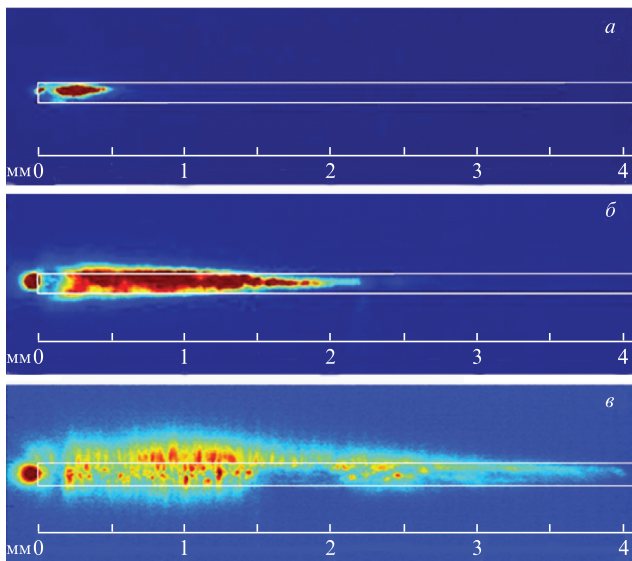


Рис.4. Снимки свечения плазмы в капиллярах (для наглядности их внешние контуры обозначены белыми линиями) с внутренним каналом  $\varnothing 50$  мкм, полученные с помощью боковой ПЗС-камеры при энергиях лазерного импульса 9 мДж, без ослабления (а); 90 мДж, без ослабления (б); 1.25 Дж, свечение дополнительно ослаблено при помощи нейтральных фильтров в  $\sim 300$  раз (в).

симости от энергии импульса лазерного излучения. Эта зависимость имеет характер, близкий к логарифмическому, и приведена на рис.5.

На всех изображениях присутствует яркое пятно на входе капилляра вблизи положения перетяжки лазерного пучка. Его происхождение, по-видимому, связано с особенностями томсоновского рассеяния, яркость которого на второй гармонике  $I_{Tscat} \sim n_e^2 I_{las}$ , где  $n_e$  – концентрация плазмы, а  $I_{las}$  – интенсивность рассеиваемого (лазерного) излучения. Яркость рассеянного излучения существенно снижается в области фокального пятна, поскольку, несмотря на высокую интенсивность лазерного излучения в этой области, объем рассеивающей среды (плазмы) мал, а сама среда разрежена. Снижение яркости свечения второй гармоники в области фокального пятна встречается и в других работах [12]. Круглая форма свечения у входа в капилляр объясняется регистрацией интегрального излучения, рассеянного осесимметричным объемом.

*Измерение параметров пучков релятивистских электронов.* Энергетическое распределение электронов

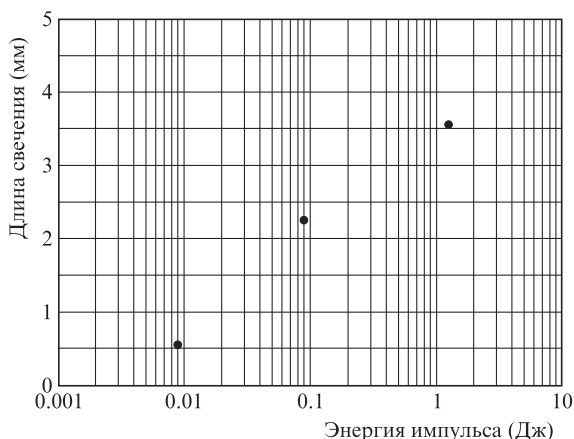


Рис.5. Зависимость длины светящейся области внутри капилляра от энергии лазерного импульса (погрешность 5%).

$d^2N_e/(dEd\Omega)$  определялось по спектрограммам, полученным магнитным спектрометром. Все зарегистрированные в экспериментах пучки электронов обладали экспоненциальным энергетическим спектром с эффективной температурой распределения  $T_{eff}$  в диапазоне 0.5–2.8 МэВ.

Суммарный заряд электронного пучка  $Q_{beam}$  рассчитывался по зарегистрированным отпечаткам на фотолуминесцентном экране IP, установленном перед спектрометром. Для этого суммарная яркость отпечатка электронного пучка сопоставлялась с яркостью изображения в окрестности входной диафрагмы спектрометра, соответствующий заряд для которой известен ( $[d^2N_e/(dEd\Omega)] \times dE$ ) по измерениям магнитного спектрометра. Отметим, что приведенная оценка предполагает независимость энергии электронов от угла их наблюдения. Поэтому в экспериментах, в которых наблюдалось неоднородное угловое распределение пучков, определение  $Q_{beam}$  указанным методом может дать значительную погрешность.

На рис.6 представлены примеры отпечатков электронных пучков при ускорении из капиллярных мишеней с различными размерами и энергиями предимпульсов. Соответствующие энергетические спектры электронов, полученные по измерениям магнитным спектрометром, приведены на рис.6,з. Концентрические кольца пониженной яркости, наблюдающиеся на изображении пучка на рис.6,б – тень от меток из свинцовой фольги толщиной 300 мкм, установленных перед экраном IP в данном эксперименте. С помощью меток учитывался вклад от рентгеновских квантов на изображении при расчете суммарного заряда электронного пучка. Они прозрачны для электронов с энергиями более 1 МэВ, но поглощают низкоэнергетичное рентгеновское излучение из лазерной плазмы. Засветка экрана в тени меток наблюдается только в месте попадания пучка электронов. Во всех экспериментах с капиллярами длиной 5 и 10 мм характерно крайне неоднородное угловое распределение электронов в пучке (см. рис.6,а и б). Суммарные заряды пучков оцениваются в 30–50 пКл. Эксперименты показали, что с увеличением диаметра капилляров растет требование к энергии предимпульса для успешной генерации релятивистских электронов. Так, если для капилляров  $\varnothing 50$  мкм ускорение происходит при энергии предимпульса  $\sim 10$  мДж, то для капилляров  $\varnothing 140$  мкм требуется уже  $\sim 1$  Дж лазерной энергии для формирования плазменной среды с подходящими для ускорения свойствами.

Наилучшие результаты получены с капиллярными мишенями  $\varnothing 140$  мкм и длиной 2 мм, при энергии предимпульса 1.2–1.5 Дж. Отпечаток электронного пучка в одном из таких экспериментов представлен на рис.6,в. Видно, что пучок коллимирован и имеет колоколообразное угловое распределение с расходимостью  $\sim 20$  мрад (на полувысоте). Полный угол раствора генерируемого пучка приблизительно соответствует аспектному соотношению капилляра (отношение диаметра капилляра к его длине). Этот вывод находится в согласии с результатами работы [7]. Максимальная энергия электронов равна 22 МэВ, суммарный заряд составляет  $200 \pm 50$  пКл.

На рис.7 представлено изображение, полученное с боковой ПЗС-камеры в эксперименте с ускорением коллимированного пучка из капилляра  $\varnothing 140$  мкм,  $l = 2$  мм, при энергии предимпульса 1.46 Дж. Примечательно, что максимум свечения наблюдается на выходе из капилляра, и это говорит о том, что значительная часть лазерного импульса прошла капилляр насквозь.

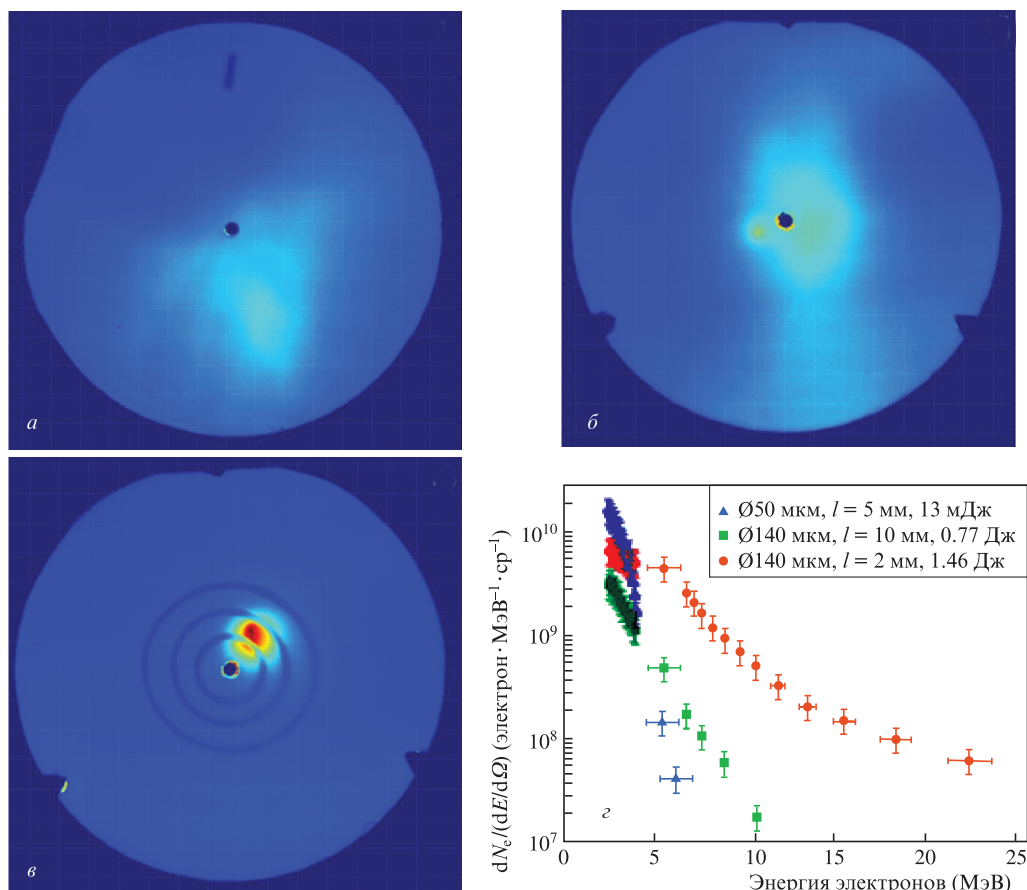


Рис.6. Изображения электронного пучка, полученные с экрана Image Plate перед магнитным спектрометром электронов: капилляр  $\varnothing 50$  мкм,  $l = 5$  мм, предимпульс 13 мДж (а), капилляр  $\varnothing 140$  мкм,  $l = 10$  мм, предимпульс 0.77 Дж (б), капилляр  $\varnothing 140$  мкм,  $l = 2$  мм, предимпульс 1.46 Дж (в); г – энергетические спектры электронов, ускоренных в направлении входной диафрагмы спектрометра. Сетка на изображениях а–в имеет шаг 1 см, что соответствует угловому раствору  $\sim 40$  мрад вблизи диафрагмы спектрометра. Спектры получены в тех же экспериментах, что и изображения на рис.а–в.

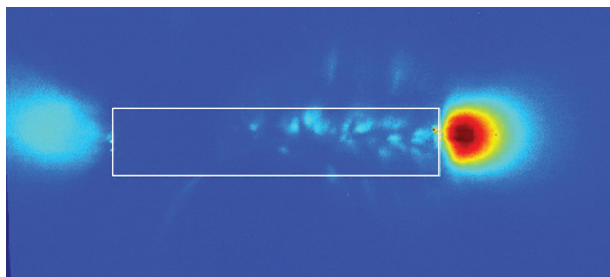


Рис.7. Снимок с боковой камеры в эксперименте с ускорением коллимированного пучка электронов в капилляре  $\varnothing 140$  мкм,  $l = 2$  мм при энергии предимпульса 1.46 Дж. Внешний контур капилляра обозначен белой линией. Лазерный импульс распространяется слева направо. Изображение получено с дополнительным ослаблением нейтральными фильтрами в 240 раз.

#### 4. Выводы

На пикосекундной лазерной установке проведены эксперименты по генерации релятивистских электронов из капиллярных мишеней. Ускорительная плазменная среда внутри капилляра формировалась за счет абляции его внутренних стенок под действием специально сформированного предимпульса ультракороткой длительности.

Экспериментально установлено, что для каждого значения внутреннего диаметра капилляра в диапазоне 50–140 мкм существует оптимальная энергия предимпульса, при которой наблюдаются ускоренные электроны.

Для капилляров с внутренним диаметром 140 мкм обнаружено, что при уменьшении длины с 10 до 2 мм значительно улучшается качество электронного пучка и повышается энергия ускоренных частиц. В экспериментах с такими капиллярами зарегистрированы пучки с угловым раствором  $\sim 40$  мрад, экспоненциальным спектром с максимальной энергией около 22 МэВ и зарядом пучка  $\sim 200$  пКл.

1. Courtois C., Edwards R., Compant La Fontaine A., et al. *Phys. Plasmas*, **20**, 083114 (2013).
2. Glinec Y., Faure J., Le Dain L., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 025003 (2005).
3. Edwards R.D., Sinclair M.A., Goldsack T.J., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **80** (12), 25 (2002).
4. Compant La Fontaine A., Courtois C., Lefebvre E. *Phys. Plasmas*, **19**, 023104 (2012).
5. Leemans W.P., Nagler B., Gonsalves A.J., et al. *Nat. Phys.*, **696**, 2 (2006).
6. Ju J., Svensson K., Ferrari H., Döpp A., et al. *Phys. Plasmas*, **20**, 083106 (2013).
7. Mori Y., Sentoku Y., Kondo K., et al. *Phys. Plasmas*, **16**, 123103 (2009).
8. Kitagawa Y., Sentoku Y., Akamatsu Sh., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 205002 (2004).
9. Zeil K., Kraft S.D., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 013307 (2010).
10. Boutoux G., Rabhi N., Batani D., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **86**, 113304 (2015).
11. Rabhi N., Bohacek K., Batani D., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 053306 (2016).
12. Najmudin Z., Dangor A.E., Modena A., et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **28** (4), 1057 (2000).