

## О влиянии давления воздуха на параметры тока пучка и рентгеновского излучения, генерируемых в газовом диоде

© М.И. Ломаев,<sup>1,2</sup> В.Ф. Тарасенко,<sup>1,2</sup> Е.Х. Бакшт<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 5 февраля 2019 г.

В окончательной редакции 5 февраля 2019 г.

Принято к публикации 21 февраля 2019 г.

Приведены результаты исследований параметров пучка убегающих электронов и рентгеновского излучения, генерируемых в газовом диоде при различных давлениях атмосферного воздуха. Подтверждено, что максимальные величины тока пучка, а также интенсивности рентгеновского излучения регистрируются при давлении воздуха  $\sim 10^2$  Па. Методом ослабления тока пучка с помощью фильтров из алюминия разной толщины определено распределение электронов пучка по энергиям. Максимум распределения соответствует энергии электронов  $\sim 100$  keV. Величина максимальной экспозиционной дозы рентгеновского излучения за анодом из медной фольги толщиной  $30 \mu\text{m}$  составила  $\sim 107$  mR. Установлено, что при плотности тока пучка более  $35 \text{ A/cm}^2$  наблюдается эффект влияния электронов пучка, поглощаемых элементами детектора рентгеновского излучения, на форму и амплитуду полезного сигнала с детектора.

**Ключевые слова:** убегающие электроны, рентгеновское излучение, газовый диод, детектор на основе алмаза.

DOI: 10.21883/JTF.2019.08.47903.35-19

### Введение

Пучки электронов с различными параметрами, формируемые в вакуумных диодах, широко используются в различных областях науки и техники [1–5]. Для получения пучков электронов на высоковольтный катод подается импульсное или постоянное напряжение. При этом ускоренные электроны выводятся в воздух атмосферного давления через окно из тонкой фольги. С прошлого столетия известно [6], что при наносекундном разряде в газах атмосферного давления можно получить пучки убегающих электронов с короткой длительностью импульса. В подобных условиях при атмосферном давлении воздуха [7] и гелия [8] также было зарегистрировано рентгеновское излучение (РИ), возникающее при торможении убегающих электронов. В работе [9] пучок убегающих электронов, формируемый при повышенных давлениях различных газов, было предложено называть сверхкоротким лавинным электронным пучком (СЛЭП). Длительность импульса тока пучка убегающих электронов с субнаносекундным временным разрешением была измерена в работе [10]. Было установлено, что она составляет за анодной фольгой  $\sim 100$  ps на полувысоте. Оптимизация условий возбуждения, а также конструкции газового диода и катода, позволили получить за анодной фольгой в воздухе атмосферного давления при длительности импульса  $\tau_{0.5} \sim 100$  ps амплитуду СЛЭП  $\sim 100$  А [11].

В работе [6], где впервые были проведены измерения числа убегающих электронов в пучке с помощью шунта, при уменьшении давления в газовом диоде было зарегистрировано увеличение числа электронов в пучке. Исследования влияния давления азота, гелия и водорода на параметры СЛЭП, проведенные с высоким временным разрешением, показали, что длительность импульса СЛЭП  $\tau_{0.5} \sim 100$  ps сохраняется до давлений в  $10^2$ – $10^3$  Па [12], а амплитуда тока пучка при этом увеличивается до  $\sim 1$  кА [13]. Кроме того, при небольших давлениях в газовом диоде, можно было, сохраняя амплитуду тока пучка в сотни ампер, регулировать длительность импульса СЛЭП на полувысоте от  $\sim 100$  ps до  $\geq 10^2$  ns [12]. Благодаря короткой длительности тока пучка и достаточно высокой амплитуде в оптимальных условиях [11–13] пучки убегающих электронов стали использоваться для изучения свечения кристаллов [14–16]. Кроме того, в последние годы возникла необходимость диагностики параметров убегающих электронов в установках типа ТОКАМАК [17–20]. Эта задача весьма актуальна в связи с влиянием убегающих электронов на нагрев плазмы и локальным разрушением стенок рабочей камеры. Для решения этой задачи необходимо разрабатывать и тестировать датчики убегающих электронов в том числе на основе излучения различных кристаллов, возникающего в них под действием пучков убегающих электронов [21,22]. Для тестирования датчиков могут применяться ускорители убегающих электронов с различными энергиями, плотностями тока и

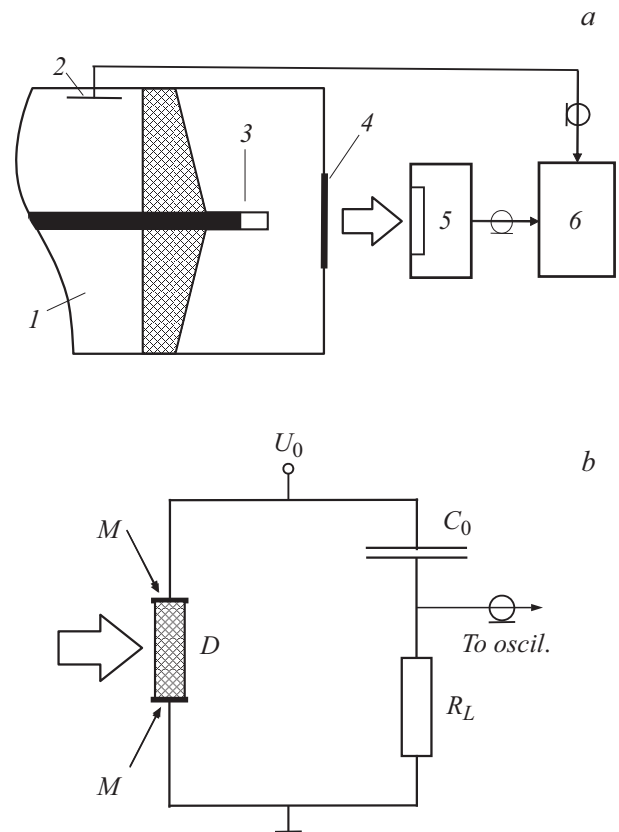
длительностями импульсов, при этом важно осуществлять регулировку длительности импульса тока пучка убегающих электронов простым способом [23]. Однако данных о параметрах СЛЭП и возможности управления ими в различных условиях сравнительно мало. Также очень мало данных о параметрах пучка убегающих электронов и сопутствующего РИ и их взаимного влияния на измерения. Можно отметить работу [24], в которой параметры СЛЭП и РИ определялись при вариации конструкции катода и межэлектродного зазора.

Цель настоящей работы — проведение комплексных измерений параметров СЛЭП и РИ при давлениях воздуха в газовом диоде сотни-тысячи Па различными методами регистрации.

## 1. Экспериментальная установка и методики измерения

Эксперименты были проведены на установке с использованием высоковольтного наносекундного генератора РАДАН-220 [25], к которому подключался газовый диод. Генератор формировал импульсы напряжения отрицательной полярности с амплитудой падающей волны в передающей линии  $\sim 120$  кВ, с длительностью фронта и длительностью на полувысоте соответственно  $\sim 0.5$  и  $\sim 2$  нс. Трубчатый катод диаметром 6 мм был выполнен из фольги толщиной  $100 \mu\text{m}$ , изготовленной из нержавеющей стали. В качестве анода выступала медная или алюминиевая фольга в форме круга диаметром 1 см, толщиной 20 и  $30 \mu\text{m}$  соответственно. Межэлектродное расстояние составляло 12 мм. Временной ход тока СЛЭП за анодной фольгой, а также заряд, переносимый в пучке, определялись с помощью коллектора с диаметром приемной части 20 мм. Временное разрешение данного коллектора составляло  $\sim 80$  пс. При измерениях тока пучка полость коллектора откачивалась до остаточного давления  $\sim 1$  Па. Распределение электронов по энергии определялось по ослаблению тока СЛЭП в фильтрах из алюминиевой фольги различной толщины методом, описанном в [26].

Для измерения экспозиционной дозы РИ, генерируемого при торможении пучка электронов в газе и на фольге, использовался портативный дозиметр W138 (ARROW-TECH Inc., HF182106, USA, диапазон измерения 0–200 мР). При измерениях приемная часть дозиметра располагалась непосредственно за фольгой газового диода. Кроме того, временной ход интенсивности РИ регистрировался с помощью детектора на основе кристалла алмаза, закрепленного между электродами, один из которых был заземлен, а на второй подавалось напряжение 100 В отрицательной полярности. При этом направление вектора напряженности электрического поля в кристалле и нормаль к открытой облучаемой поверхности кристалла были перпендикулярны. Расстояние между фольгой газового диода и облучаемой поверхностью детектора составляло 1 см. Для регистрации



**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки (а) и электрическая схема детектора на основе кристалла алмаза (б). 1 — генератор РАДАН-220, 2 — емкостной делитель напряжения, 3 — трубчатый катод, 4 — заземленная фольга, 5 — коллектор тока СЛЭП или детектор на основе кристалла алмаза, 6 — осциллограф,  $R_L$  — нагрузочное сопротивление,  $C_0$  — зарядная емкость,  $U_0$  — зарядное напряжение,  $D$  — кристалл алмаза,  $M$  — зоны металлизации поверхностей кристалла. Стрелки указывают направление регистрируемых потоков СЛЭП и РИ.

электрических импульсов использовались радиочастотные кабели 5D-FB и разъемы N-типа, высоковольтные аттенюаторы Barth Electronics 142-NM, а также осциллограф KeySight DSO-X6004A с полосой пропускания до 6 GHz и частотой дискретизации 20 GS/s. Блок-схема экспериментальной установки и электрическая схема детектора на основе кристалла алмаза приведены на рис. 1, а, б соответственно. В качестве рабочего газа для формирования СЛЭП использовался воздух при давлении не выше  $10^5$  Па.

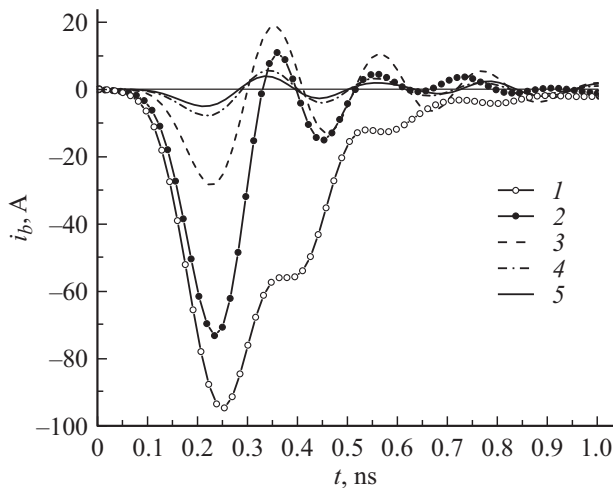
## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Измерение основных параметров тока СЛЭП

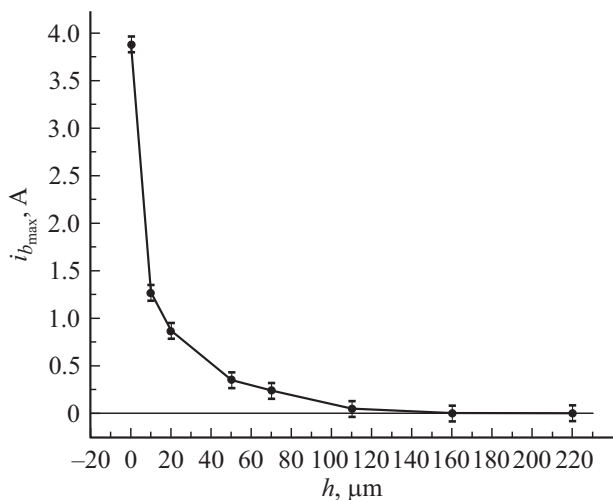
Основные параметры тока СЛЭП — временной ход, амплитуда и длительность импульса тока СЛЭП на полувысоте, а также величины напряжения пробоя —

№	Давление воздуха, $10^2, \text{Pa}$	Амплитуда тока пучка, А	Максимальная плотность тока пучка, $\text{A}/\text{cm}^2$	Длительность импульса тока пучка на полувысоте, ps	Переносимый заряд за импульс, nC	Напряжение пробоя, kV
1	6.5	94	120	270	4.9	222
2	13	73	93	107	2.2	215
3	26	28	36	109	0.35	198
4	50	8	10	107	0.08	168
5	100	5	6.5	116	0.024	149

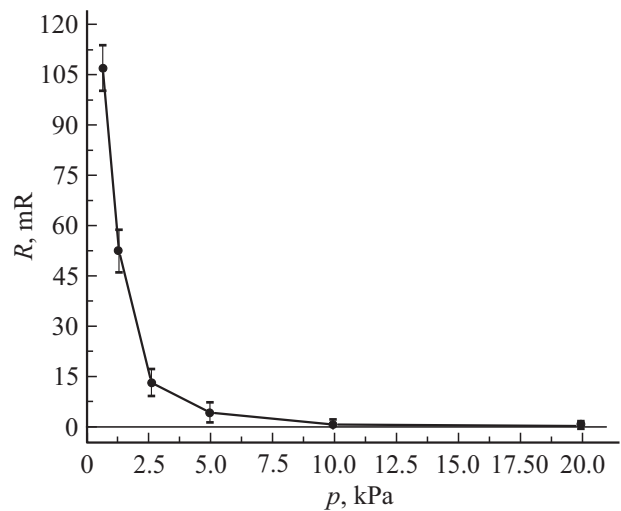
были определены в зависимости от давления воздуха в разрядной камере. Кроме того, на основе полученных данных были рассчитаны величины плотности тока



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов тока пучка быстрых электронов при давлении воздуха в диоде: 1 —  $6.5 \cdot 10^2$ , 2 —  $1.3 \cdot 10^3$ , 3 —  $2.6 \cdot 10^3$ , 4 —  $5 \cdot 10^3$ , 5 —  $10^4$  Pa. Анод — алюминиевая фольга толщиной  $30 \mu\text{m}$ .

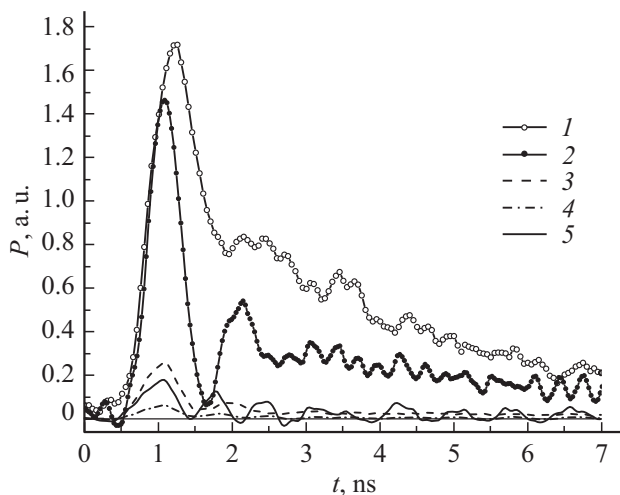


**Рис. 3.** Амплитуда тока пучка быстрых электронов в зависимости от толщины фильтра из алюминия. Давление воздуха  $5 \cdot 10^3$  Pa.

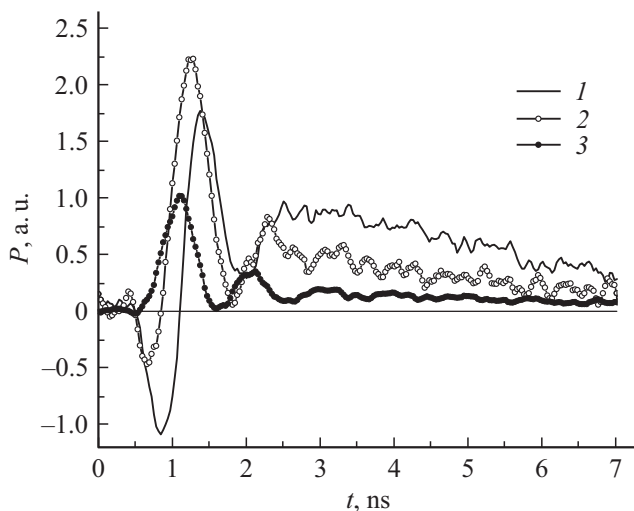


**Рис. 4.** Зависимость экспозиционной дозы РИ за один импульс от давления воздуха в диоде. Анод — медная фольга толщиной  $20 \mu\text{m}$ .

пучка и заряда, переносимого убегающими электронами за один импульс. В таблице и на рис. 2 приведены соответственно данные по основным параметрам тока СЛЭП и напряжению пробоя, а также осциллограммы импульсов тока СЛЭП при различных давлениях воздуха. В качестве анода использовалась фольга из алюминия толщиной  $30 \mu\text{m}$ . В данных условиях существенное увеличение амплитуды тока СЛЭП начиналось при давлении воздуха ниже  $10^4$  Pa. Наибольшая амплитуда тока пучка и величина переносимого заряда достигались при давлении  $6.5 \cdot 10^2$  Pa. При этом давлении наблюдалось также заметное увеличение длительности импульса тока СЛЭП. Энергетический спектр убегающих электронов при давлении воздуха  $5 \cdot 10^3$  Pa определялся на основе кривой ослабления тока пучка (рис. 3), а также уменьшения величины переносимого заряда за фольгой фильтрами из алюминия различной толщины (от 0 до  $220 \mu\text{m}$ ). При этом для увеличения механической прочности анодной фольги использовалась сетка с прозрачностью  $\sim 50\%$ . Максимум распределения электронов пучка по энергиям при данном значении давления воздуха соответствовал энергии электронов  $\sim 100 \text{keV}$ .



**Рис. 5.** Временной ход сигнала с детектора РИ при различных давлениях воздуха в диоде: 1 —  $6.5 \cdot 10^2$ , 2 —  $1.3 \cdot 10^3$ , 3 —  $2.6 \cdot 10^3$ , 4 —  $5 \cdot 10^3$ , 5 —  $10^4$  Па. В случае давления  $10^4$  Па сигнал с детектора увеличен в 10 раз. Анод — медная фольга толщиной  $20 \mu\text{m}$ .



**Рис. 6.** Временной ход сигнала с детектора РИ при различных давлениях воздуха в диоде: 1 —  $1.3 \cdot 10^3$ , 2 —  $1.8 \cdot 10^3$ , 3 —  $2.6 \cdot 10^3$  Па. Анод — алюминиевая фольга толщиной  $30 \mu\text{m}$ .

## 2.2. Измерение параметров рентгеновского излучения

Измерения экспозиционной дозы и интенсивности РИ проводились с использованием анода из медной или алюминиевой фольг толщиной 20 и  $30 \mu\text{m}$  соответственно. На рис. 4, 5 приведены зависимость величины экспозиционной дозы и временной ход интенсивности РИ от давления воздуха для анода из медной фольги толщиной  $20 \mu\text{m}$ . Из рисунков видно, что данные по экспозиционной дозе и интенсивности РИ коррелируют между собой. Кроме того, увеличение длительности тока пучка при уменьшении давления воздуха приводит к

росту длительности импульса и величины экспозиционной дозы РИ (рис. 2, 4, 5). В случае регистрации РИ за алюминиевой фольгой при низких давлениях воздуха и соответственно больших величинах тока пучка (рис. 2) проявилось взаимное влияние РИ и электронов пучка на амплитуду и форму регистрируемых сигналов с алмазного детектора. На рис. 6 приведены осциллограммы сигналов с детектора при различных давлениях воздуха в диапазоне  $1.3 \cdot 10^3$ – $2.6 \cdot 10^3$  Па. Из рисунка видно, что при уменьшении давления воздуха, что соответствует увеличению тока СЛЭП, наблюдается искажение сигнала с детектора РИ. Наиболее вероятной причиной наблюдаемого эффекта является импульсное (за доли наносекунд) уменьшение потенциала высоковольтной обкладки конденсатора  $C_0$  при поглощении части заряда электронов пучка кристаллом алмаза, а также потенциальным электродом  $M$  (рис. 1). В начальные моменты времени это вызывает протекание тока на заземленную обкладку конденсатора  $C_0$  для достижения величины потенциала данной обкладки, близкой к нулю. Позднее через нагрузочное сопротивление преимущественно протекает ток разрядки конденсатора  $C_0$  обратного направления вследствие нарастания проводимости кристалла алмаза под действием РИ. При уменьшении тока пучка, что соответствует давлениям воздуха  $2.6 \cdot 10^3$  Па и более, указанный эффект практически не проявляется.

## Заключение

В работе проведены измерения основных параметров тока СЛЭП — временного хода, амплитуды и длительности импульса на полувывоте за фольгами из алюминия и меди с толщинами соответственно 30 и  $20 \mu\text{m}$ , при давлениях воздуха в газовом диоде от  $(6.5-100) \cdot 10^2$  Па. При уменьшении давления воздуха наблюдается увеличение напряжения пробоя, величины перенесенного заряда за импульс, амплитуды, а также длительности импульса тока СЛЭП. Максимальная плотность тока пучка, зарегистрированная за фольгой из алюминия толщиной  $30 \mu\text{m}$  при давлении воздуха  $6.5 \cdot 10^2$  Па, составила  $120 \text{ A/cm}^2$ . Методом измерения ослабления тока пучка и перенесенного заряда фильтрами из алюминия с толщиной от 0 до  $220 \mu\text{m}$  установлено, что максимум распределения электронов СЛЭП по энергиям при давлении воздуха  $5 \cdot 10^3$  Па соответствует энергии электронов  $\sim 100 \text{ keV}$ .

При давлениях воздуха  $(6.5-100) \cdot 10^2$  Па детектором на основе кристалла алмаза и портативным дозиметром W138 зарегистрированы соответственно временной ход интенсивности, а также экспозиционная доза РИ излучения за фольгой из меди толщиной  $20 \mu\text{m}$ . Максимальная величина экспозиционной дозы РИ составила  $\sim 107 \text{ mR}$  при давлении воздуха  $6.5 \cdot 10^2$  Па. При плотности тока СЛЭП более  $35 \text{ A/cm}^2$  на сигнал с детектора РИ на основе кристалла алмаза оказывает влияние пучок электронов. Попадание на кристалл алмаза, а также на

потенциальный электрод детектора электронов пучка искажает сигнал с детектора. При отрицательной полярности напряжения питания детектора это приводит к уменьшению амплитуды, длительности и формы полезного сигнала.

### Благодарности

Авторы благодарят А.В. Шишлова за предоставление детектора на основе кристалла алмаза.

### Финансирование работы

Исследование было выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00184).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Pierce J.R.* Theory and Design of Electron Beams. NY: D. Van Nostrand Co., 1954. 222 p.
- [2] *Hegeler F., Friedman M., Myers M.C., Sethian J.D., Swanekamp S.B.* // Phys. Plasmas. 2002. Vol. 9. P. 4309. DOI:10.1063/1.1506925
- [3] *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [4] *Окс Е.М.* Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: Изд-во научно-технической литературы, 2005. 216 с.
- [5] *Tsimring S.E.* Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 576 p.
- [6] *Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 564–568.
- [7] *Станкевич Ю.Л., Калинин В.Г.* // ДАН СССР. 1967. Т. 177. № 1. С. 72–73.
- [8] *Noggle R.C., Krider E.P., Wayland J.R.* // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 4746–4748.
- [9] *Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А.* // Изв. вузов. Физика. 2003. № 3. С. 94–95. [*Tarasenko V.F., Orlovskii V.M., Shunailov S.A.* // Russian Physics Journal. 2003. Vol. 46. N 3. P. 325–327.]
- [10] *Tarasenko V.F., Shunailov S.A., Shpak V.G., Kostyrya I.D.* // Laser and Particle Beams. 2005. Vol. 23. N 4. P. 545–551. DOI:10.1017/S0263034605050731
- [11] *Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 1. С. 80–85. [*Kostyrya I.D., Rybka D.V., Tarasenko V.F.* // Instruments and Experimental Techniques. 2012. Vol. 55. N 1. P. 72–77. DOI: 10.1134/S0020441212010071]
- [12] *Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Шутько Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 8. С. 60–67. [*Tarasenko V.F., Baksh E.Kh., Burachenko A.G., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Shut'ko Yu.V.* // Tech. Phys. Lett. 2010. Vol. 36. N 4. P. 375–378. DOI: 10.1134/S1063785010040255]
- [13] *Бакут Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 21. С. 69–75. [*Baksh E.Kh., Lomaev M.I., Rybka D.V., Tarasenko V.F.* // Tech. Phys. Lett. 2006. Vol. 32. N 11. P. 948–950. DOI: 10.1134/S1063785006110125]
- [14] *Лунатов Е.И., Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Алексеев С.Б., Рыбка Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 6. С. 29–33. [*Lipatov E.I., Tarasenko V.F., Orlovskii V.M., Alekseev S.B., Rybka D.V.* // Tech. Phys. Lett. 2005. Vol. 31. N 3. P. 231–232.]
- [15] *Babich L.P., Becker K.H., Loiko T.V.* // IEEE Transaction Plasma Sci. 2009. Vol. 37. N 11. P. 2261–2264. DOI:10.1109/TPS.2009.2030577
- [16] *Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 21. С. 102–110. [*Baksh E.Kh., Burachenko A.G., Tarasenko V.F.* // Tech. Phys. Lett. 2010. Vol. 36. N 11. P. 1020–1023. DOI: 10.1134/S1063785010110143]
- [17] *Pourshahab B., Abdi M.R., Sadighzadeh A., Rasouli C.I.* // Phys. Plasmas. 2016. Vol. 23. P. 072501. <https://doi.org/10.1063/1.4955218>
- [18] *Zeng L., Chen Z.Y., Dong Y.B., Koslowski H.R., Liang Y., Zhang Y.P., Zhuang H.D., Huang D.W., Gao X.* // Nuclear Fusion. 2017. Vol. 57. N 4. P. 046001. DOI:10.1088/1741-4326/aa57d9
- [19] *Rubel M., Brezinsek S., Coenen J.W., Huber A., Kirschner A., Kreter A., Petersson P., Philipps V., Pospieszczyk A., Schweer B., Sergienko G., Tanabe T., Ueda Y., Wienhold P.* // Matter and Radiation at Extremes. 2017. Vol. 2. N 3. P. 87–104. <https://doi.org/10.1016/j.mre.2017.03.002>
- [20] *Zebrowski J., Jakubowski L., Rabinski M., Sadowski M.J., Jakubowski M.J., Kwiatkowski R., Malinowski K., Mirowski R., Mlynar J., Ficker O., Weinzettl V., Causa F.* // J. Physics: Conference Series. 2018. Vol 959. N 1. P. 012002. DOI :10.1088/1742-6596/959/1/012002
- [21] *Sadowski M.J.* // Nukleonika. 2011. Vol. 56. N 2. P. 85–98.
- [22] *Savrukhin P.V., Shestakov E.A.* // Nuclear Fusion. 2015. Vol. 55. N 4. P. 043016. DOI: 10.1088/0029-5515/55/4/043016
- [23] *Sorokin D.A., Burachenko A.G., Beloplotov D.V., Tarasenko V.F., Baksh E.Kh., Lipatov E.I., Lomaev M.I.* // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 122. P. 154902. <https://doi.org/10.1063/1.4996965>
- [24] *Алексеев С.Б., Бакут Е.Х., Бойченко А.М., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 9. С. 12–18. [*Alekseev S.B., Baksh E.Kh., Boichenko A.M., Kostyrya I.D., Tarasenko V.F., Tkachev A.N.* // Tech. Phys. 2012. Vol. 57. N 9. P. 1192–1198. DOI: 10.1134/S1063784212090022]
- [25] *Mesyats G.A., Korovin S.D., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I.* // Proceedings of the IEEE 2004. Vol. 92. N 7. P. 1166–1179. DOI: 10.1109/JPROC.2004.829005
- [26] *Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Vorobyev M.S., Baksh E.Kh., Burachenko A.G., Koval N.N., Tarasenko V.F.* // Laser and Particle Beams. 2015. Vol. 33. P. 183–192. DOI:10.1017/S0263034615000324