

НАНОСЕКУНДНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ С НЕОДНОРОДНОЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИЕЙ И ГАЗОНАПОЛНЕННЫМ ДИОДОМ

© 2020 г. В. Ф. Тарасенко^а, С. Б. Алексеев^а, Е. Х. Бакшт^{а,*},
А. Г. Бураченко^а, М. И. Ломаев^а

^а Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

*e-mail: beh@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 23.01.2020 г.

После доработки 23.01.2020 г.

Принята к публикации 24.01.2020 г.

Описана конструкция и приведены параметры наносекундного ускорителя с дополнительной передающей линией, имеющей переменное волновое сопротивление, и газонаполненным диодом. Показана возможность управления параметрами тока пучка за счет изменения давления воздуха в диоде. За анодной фольгой при длительности импульса на полувысоте ≈ 1.3 нс и энергии электронов до 350 кэВ амплитуда тока пучка составила ≈ 700 А. При возбуждении пучком данного ускорителя в кварце, сапфире и синтетическом алмазе зарегистрированы спектры и осциллограммы излучения Вавилова–Черенкова.

DOI: 10.31857/S0032816220040096

ВВЕДЕНИЕ

Ускорители электронов используются в различных областях науки и техники [1, 2] и продолжают совершенствоваться [3, 4]. Пучки электронов обычно формируются в вакуумных диодах, а для вывода тока пучка в воздух и другие газы в большинстве ускорителей применяют аноды из тонкой фольги. Начиная с прошлого столетия разрабатываются и исследуются ускорители пучков электронов наносекундной и пикосекундной длительности с энергией в сотни килоэлектронвольт, а также источники тормозного рентгеновского излучения на основе таких ускорителей [5–21].

При разработке наносекундных малогабаритных ускорителей и рентгеновских аппаратов используют различные схемы формирования импульсов высокого напряжения. Наиболее распространены устройства с применением импульсных трансформаторов [5], схемы Маркса [8] и с использованием индуктивных накопителей энергии [14, 21]. Для уменьшения длительности импульса напряжения используют обострители различной конструкции на основе разрядников высокого давления [15, 20] и твердотельных коммутаторов [21]. Все это позволяет создавать ускорители с различными параметрами и осуществлять регулировку амплитуды и длительности импульсов тока пучка.

Последние годы для увеличения амплитуды импульса напряжения и сокращения его длитель-

ности стали использовать дополнительные линии с ферритовыми кольцами [21–23]. Однако такие линии необходимо помещать в магнитное поле. Для этого нужны магниты цилиндрической формы, длина которых равна длине линии, что существенно усложняет конструкцию ускорителя.

В данной работе показано, что можно использовать и другие подходы для повышения энергии электронов и регулировки длительности импульса тока пучка, которые позволяют создавать ускорители электронов сравнительно простой конструкции. Соответственно целью данной работы были разработка и исследование ускорителя с напряжением холостого хода 500 кВ, энергией электронов до

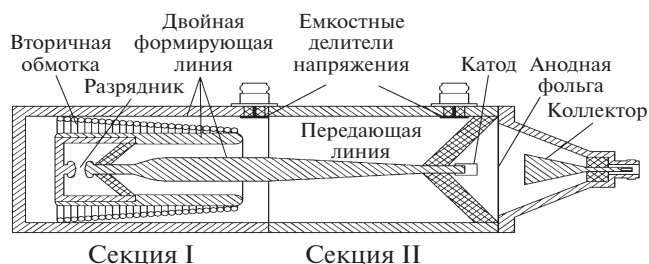


Рис. 1. Схема высоковольтного блока ускорителя, состоящего из двух секций и газонаполненного диода, к которому подключен конический коллектор. Обе секции ускорителя заполнены трансформаторным маслом.

350 кэВ, длительностью импульса тока пучка ~ 1 нс и плотностью тока за фольгой более 200 А/см².

Для увеличения энергии электронов в ускорителе была использована дополнительная линия с переменным волновым сопротивлением, а для управления длительностью импульса тока пучка и энергией электронов диод заполнялся воздухом до давлений 0.1–10 Торр. Отметим, что возможность управления длительностью импульса тока пучка и его амплитудой в газонаполненных диодах была исследована в работах [24–26].

УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Конструкция высоковольтного блока ускорителя, который состоит из двух секций и газонаполненного диода, представлена на рис. 1.

В первой секции ускорителя, как и в работе [15], используется двойная формирующая линия. Однако вместо разрядника с регулируемым зазором, который расположен между средним и заземленным коаксиальными электродами, применялся промышленный двухэлектродный разрядник высокого давления Р-49, который соединялся с внутренним электродом.

Волновые сопротивления каждой из двух формирующих линий первой секции равнялись ≈ 20 Ом. Сопротивление короткой передающей линии равнялось 50 Ом. После короткой передающей линии устанавливалась вторая секция ускорителя, которая состояла из неоднородной передающей линии длиной 20 см, волновое сопротивление которой плавно изменялось от 50 до 100 Ом. Применение второй секции позволяет простым способом увеличить амплитуду импульса напряжения. Диаметр внутреннего электрода неоднородной линии на входе в газонаполненный диод составлял 8 мм, а внутренний диаметр внешнего цилиндра коаксиальной линии равнялся 102 мм. Это обеспечивало сравнительно высокую прочность изолятора газового диода.

Трубчатый катод с внутренним диаметром 8 мм был изготовлен из фольги из нержавеющей стали толщиной 100 мкм. Межэлектродный зазор мог изменяться от 2 до 13 мм. Вывод тока пучка осуществлялся через AlMg-фольгу толщиной 40 мкм. Ток пучка регистрировался с помощью конического коллектора с временным разрешением не хуже 0.1 нс [27]. Измерения импульсов напряжения на выходе из первой и второй секций ускорителя осуществлялись с помощью емкостных делителей.

Зарядка двойной формирующей линии осуществлялась от вторичной обмотки импульсного трансформатора, который был расположен между двумя коаксиальными цилиндрами со встроенными магнитными сердечниками, при разряде конденсатора через первичную обмотку транс-

форматора (на рисунке не показаны). Далее, при срабатывании разрядника высокого давления Р-49, в секции I формировался наносекундный импульс напряжения с амплитудой ≈ 190 кВ, который по короткой передающей линии и линии с переменным волновым сопротивлением подавался на трубчатый катод. Это позволяло получить импульсы напряжения длительностью 2.5 нс с амплитудой при холостом ходе ≈ 500 кВ. Давление воздуха в диоде могло изменяться от 0.1 до 760 Торр. Как было показано в работах [24, 28], оптимальные давления в диоде для получения максимальных амплитуд тока пучка в гелии, водороде и азоте отличаются. В данном ускорителе для заполнения газового диода применялся воздух.

Сигналы с емкостных делителей и коллектора подавались на цифровой осциллограф Keysight DSO-X6004A (6 ГГц и 20 выборок/нс) через высокочастотные кабели 5D-FB PEEG (Radiolab) длиной 1.2 м. Для ослабления сигналов использовались ослабители 142-NM (Barth Electronics, 30 ГГц), позволяющие регистрировать без существенных искажений импульсы напряжения с длительностью фронта до 20 пс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТОКА ПУЧКА

Осциллограммы импульсов напряжения и тока пучка показаны на рис. 2. Эти осциллограммы были сняты в режиме, близком к оптимальному для проведения экспериментов по изучению параметров излучения Вавилова–Черенкова [29]. Амплитуда импульса напряжения на диоде составляла ≈ 350 кВ, а ток, регистрируемый коллектором с диаметром приемной части 15 мм, составлял ≈ 700 А. Плотность тока пучка за фольгой с центральной площадки $\varnothing 3$ мм составила ≈ 220 А/см². Осциллограммы импульсов напряжения и тока пучка в этом режиме состояли из двух импульсов. Длительность первого (основного) импульса на полувывоте равнялась ≈ 1.3 нс.

Второй импульс тока пучка имел меньшую амплитуду и регистрировался только при уменьшении давления в газонаполненном диоде и/или увеличении межэлектродного зазора. Он возник из-за различий сопротивлений генератора и газонаполненного диода, которые увеличивались при увеличении сопротивления диода. Однако за счет этого рассогласования можно было увеличивать напряжение на промежутке и, соответственно, энергию электронов.

Влияние давления воздуха в газонаполненном диоде на амплитуду импульсов напряжения и тока первого импульса пучка, а также на длительность тока пучка на полувывоте показано на рис. 3.

Видно, что в этих условиях значительное увеличение амплитуды напряжения на промежутке

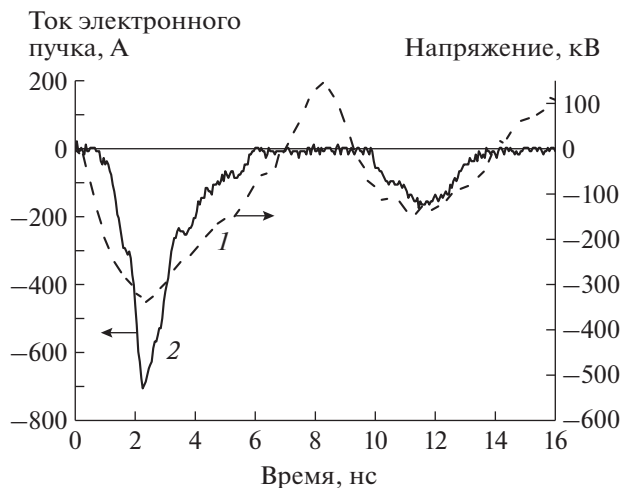


Рис. 2. Осциллограммы импульса напряжения на диоде (1) и тока пучка за фольгой (2) при межэлектродном зазоре $d = 11.5$ мм и давлении воздуха в диоде $p \approx 0.8$ Торр.

начинается при давлении воздуха < 2 Торр, а максимальные напряжения регистрируются при давлении < 0.5 Торр. Соответственно для получения электронов пучка с максимальными энергиями надо работать в этой области давлений. Однако длительность импульса тока пучка с уменьшением давления увеличивается и для получения импульсов с длительностью на полувысоте $\tau_{0.5} < 1$ нс давление воздуха в газовом диоде должно превышать 1 Торр.

Как видно из рис. 3, максимальная амплитуда тока пучка при оптимальном давлении и межэлектродном зазоре 11.5 мм составила 900 А. Увеличение давления в диоде до 2 Торр приводило к уменьшению амплитуды тока пучка до ≈ 250 А. Для получения длительности импульса $\tau_{0.5} \approx 0.1$ нс давление воздуха в диоде должно быть увеличено до 100 Торр и более. Однако это приводило к значительному уменьшению амплитуды тока пучка.

При давлении воздуха 400 Торр в диоде амплитуда тока пучка составила 3 А, а при атмосферном давлении — 1.3 А. Амплитуда импульса напряжения при давлениях воздуха 400 и 760 Торр равнялась ≈ 135 кВ. Малые токи пучка при повышенных давлениях в данных условиях были обусловлены длительностью фронта импульса напряжения, которая составляла ≈ 2 нс.

При длительности фронта импульса напряжения ≈ 0.3 нс на генераторе СЛЭП-150 с трубчатым катодом диаметром 6 мм амплитуда тока пучка составила при атмосферном давлении воздуха и амплитуде напряжения на диоде 180 кВ (140 кВ в падающей волне напряжения) составила 10 А [30]. Переход к сетчатому катоду диаметром 40 мм позволил получить на генераторе СЛЭП-150 при напряжении в падающей волне 200 кВ амплитуду тока пучка за фольгой ≈ 100 А с длительностью импульса на полувысоте 0.1 нс [17].

Влияние межэлектродного зазора на амплитуду напряжения и тока пучка первого и второго импульсов, а также на длительность тока пучка на полувысоте демонстрирует рис. 4.

При получении этих зависимостей давление в диоде при непрерывной откачке форвакуумным насосом через шланг малого диаметра составляло ≈ 0.8 Торр. Это давление при длительности импульса на полувысоте ≈ 1.3 нс соответствовало области наибольших амплитуд тока пучка в первом импульсе для $d = 11.5$ мм. При уменьшении межэлектродного зазора амплитуда тока пучка увеличивалась, но напряжение на диоде уменьшалось. Также увеличивалась длительность импульса тока пучка на полувысоте. Второй импульс тока пучка при малых зазорах не регистрировался, что связано с уменьшением сопротивления диода и, соответственно, напряжения на нем. Электроны второго импульса пучка при малых зазорах поглощались анодной фольгой.

Испытание ускорителя с катодом диаметром 4 мм из фольги толщиной 100 мкм, также изготовленного из нержавеющей стали, дали подобную зависимость. При уменьшении межэлектродного

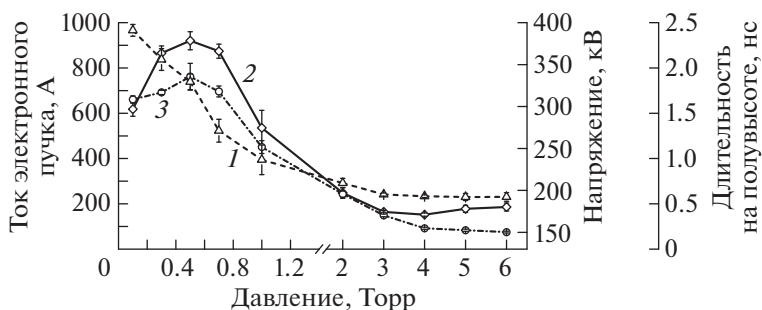


Рис. 3. Зависимости амплитуды импульса напряжения на диоде (1), а также амплитуды (2) и длительности (3) тока пучка за фольгой, от давления воздуха. Межэлектродный зазор $d = 11.5$ мм.

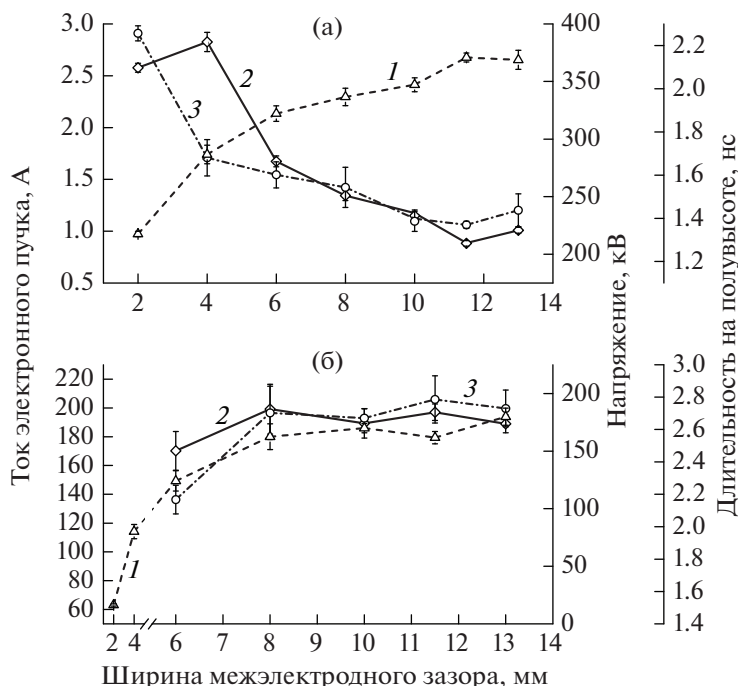


Рис. 4. Влияние межэлектродного зазора на амплитуду первого (а) и второго (б) импульсов напряжения (1) и тока пучка (2), а также на длительность импульса тока пучка на полувысоте (3). Давление воздуха в диоде $p \approx 0.8$ Торр.

зазора от 8 до 4 мм напряжение на промежутке уменьшалось, а амплитуда тока пучка и его длительность увеличивались. Амплитуда тока пучка при $d = 2.75$ мм составила ≈ 3.2 кА, но амплитуда импульса напряжения была ≈ 230 кВ. При одинаковом давлении в газовом диоде и одинаковых d диаметр катода существенно не повлиял на амплитуду тока пучка.

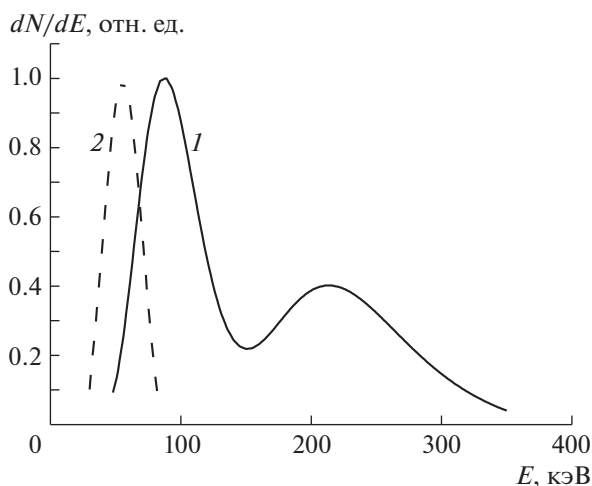


Рис. 5. Распределение электронов по энергиям для первого (1) и второго (2) импульсов тока пучка электронов. $d = 11.5$ мм, $p \approx 0.8$ Торр. Оба распределения нормированы на единицу.

Для определения спектров тока пучка за фольгой применялась методика, использующая кривые ослабления тока пучка фильтрами, которая описана в работах [31, 32]. Между фольгой и коллектором устанавливались фольги из алюминия различной толщины и измерялись амплитуды и длительности импульсов тока пучка. Далее из полученной кривой ослабления восстанавливался спектр электронов. На рис. 5 представлены спектры электронного пучка для первого и второго импульсов при $p \approx 0.8$ Торр и $d = 11.5$ мм.

Согласно расчетам, для первого импульса на распределении электронов по энергиям имелись две группы с 50–150 и 180–350 кэВ. Во втором импульсе в этих же условиях энергия электронов не превышала 100 кэВ и распределение имело один максимум.

Созданный ускоритель будет использован для исследований излучения Вавилова–Черенкова в кварце КУ-1, сапфире и синтетическом алмазе типа Па, полученном методом газофазного осаждения. В предварительных экспериментах, как и в работе [29], с помощью стандартного спектрометра было зарегистрировано излучение Вавилова–Черенкова. Интенсивность данного излучения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра увеличивалась в области прозрачности образцов с уменьшением длины волны. Кроме того, импульсы излучения Вавилова–Черенкова по длительности и форме совпадали с длительностью и формой тока пучка. В отличие от работы

[29], в которой использовался ускоритель с длительностью импульса на полувывоте 12 нс, данный ускоритель при подобном распределении электронов по энергиям имел $\tau_{0,5} \approx 1.3$ нс.

ВЫВОДЫ

Создан ускоритель электронов с напряжением холостого хода 500 кВ, который имеет сравнительно простую конструкцию. Приведены параметры тока пучка и напряжения на промежутке при изменении давления воздуха в диоде и показана возможность управления этими параметрами. При напряжении на диоде 350 кВ и амплитуде тока пучка 700 А получена длительность импульса тока пучка на полувывоте 1.3 нс. Продемонстрировано, что дополнительная линия с переменным волновым сопротивлением позволяет увеличивать напряжение на промежутке и, соответственно, и энергию электронов. В кварце КУ-1, сапфире и синтетическом алмазе с помощью стандартного спектрометра зарегистрировано излучение Вавилова—Черенкова, интенсивность которого в ультрафиолетовой и видимой областях спектра увеличивается с уменьшением длины волны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 18-19-00184.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Martin T.H. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1973. V. 20. № 3. P. 289.
<https://doi.org/10.1109/TNS.1973.4327103>
- Mehnert R. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 1996. V. 113. № 1–4. P. 81.
[https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)01344-X](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)01344-X)
- Желтов К.А. Пикосекундные сильноточные электронные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1991. ISBN 5-283-03978-1.
- Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. ISBN 5-02-033049-3.
- Зеленский К.Ф., Трошкин И.А., Цукерман В.А. // ПТЭ. 1963. № 2. С. 140.
- Charbonnier F.M., Barbour J.P., Brewster J.L., Dyke W.P., Grundhauser F.J. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1967. V. 14. № 3. P. 789.
<https://doi.org/10.1109/TNS.1967.4324658>
- Белкин Н.В., Комяк Н.И., Пеликс Е.А., Цукерман В.А. // ПТЭ. 1972. № 2. С. 194.
- Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Шнак В.Г. // ПТЭ. 1976. № 6. С. 73.
- Белкин Н.В., Тараканов М.Ю., Тарасов М.Д. // ПТЭ. 1987. № 6. С. 133.
- Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шнак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146.
- Желтов К.А., Коробков С.А., Петренко А.Н., Шалиманов В.Ф. // ПТЭ. 1990. № 1. С. 37.
- Адуев Б.П., Шнак В.Г. // ПТЭ. 1990. № 2. С. 49.
- Gubarov V.P., Korovin S.D., Pegel I.V., Roitman A.M., Rostov V.V., Stepchenko A.S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. № 2. P. 258.
<https://doi.org/10.1109/27.602497>
- Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. // ПТЭ. 1997. № 4. С. 84.
- Шнак В.Г., Яландин М.И. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5.
- Hasegawa D., Kamada K., Kuraku A., Ando R., Masuzaki M. // Jpn. J. Appl. Phys. 2001. V. 40. № 2B. P. 944.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.40.944>
- Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2012. № 1. С. 80.
- Соковнин С.Ю., Балезин М.Е., Щербинин С.В. // ПТЭ. 2013. № 4. С. 47.
<https://doi.org/10.7868/S0032816213040137>
- Kumar R., Chandra R., Mitra S., Beg M.D., Sharma D.K., Sharma A., Mittal K.C. // J. Instrum. 2014. V. 9. № 4. P04017.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/04/P04017>
- Авилов Э.А., Белкин Н.В., Дудин А.В., Зыков А.П., Канунов М.А., Разин А.А. // ПТЭ. 1973. № 1. С. 137.
- Rukin S.N. // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. № 1. P. 011501.
<https://doi.org/10.1063/1.5128297>
- Romanchenko I.V., Rostov V.V., Gunin A.V., Konev V.Y. // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 2. P. 024703.
<https://doi.org/10.1063/1.4975182>
- Gusev A.I., Pedos M.S., Rukin S.N., Timoshenkov S.P. // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 7. P. 074703.
<https://doi.org/10.1063/1.4993732>
- Бураченко А.Г., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 24. С. 85.
- Алексеев С.Б., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2013. № 5. С. 85.
<https://doi.org/10.7868/S0032816213040162>
- Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Бакуит Е.Х. // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 8. С. 1277.
- Tarasenko V.F., Rybka D.V. // High Voltage. 2016. V. 1. № 1. P. 43.
<https://doi.org/10.1049/hve.2016.0007>
- Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Lomaev M.I., Sorokin D.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. № 10. P. 2583.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2041474>
- Tarasenko V.F., Oleshko V.I., Erofeev M.V., Lipatov E.I., Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Burachenko A.G., Baksht E.Kh. // J. Appl. Phys. 2019. V. 125. № 24. P. 244501.
<https://doi.org/10.1063/1.5094956>
- Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Бакуит Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 21. С. 79.
- Baksht E.H., Burachenko A.G., Kozhevnikov V.Yu., Kozurev A.V., Kostyrya I.D., Tarasenko V.F. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. № 30. P. 305201.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/30/305201>
- Kozurev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Vorobyev M.S., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Koval N.N., Tarasenko V.F. // Laser Part. Beams. 2015. V. 33. № 2. P. 183.
<https://doi.org/10.1017/S0263034615000324>