

Изгибы на искровых лидерах при наносекундных разрядах в газах повышенного давления

© В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, М.В. Ерофеев, М.И. Ломаев

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 12 июля 2013 г.)

В условиях генерации пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения исследовано формирование искровых лидеров и диффузного разряда при пробое промежутков с неоднородным электрическим полем в различных газах при повышенных давлениях. На электрод с малым радиусом кривизны подавались импульсы напряжения отрицательной полярности. При длительностях фронта импульса напряжения ~ 0.5 и ~ 1.5 ns были зарегистрированы изгибы на искровых лидерах, причем в ряде случаев наблюдалось два изгиба, располагавшихся под прямым углом к продольным осям лидеров. Показано, что формированию искровых лидеров предшествует появление диффузных треков, которые за время не более 1 ns переключают промежуток.

Введение

Формирование искровых и объемных разрядов при атмосферном давлении различных газов исследовалось в большом числе работ, см., например, монографии [1–3], сборник [4] и обзоры [5–8], а также ссылки в них. В работах [8,9] было показано, что при импульсных разрядах в неоднородном электрическом поле и больших межэлектродных промежутках катодонаправленный и анодонаправленный лидеры соединяются друг с другом каналом, который перпендикулярен к обоим лидерам. Данный режим пробоя промежутка в воздухе атмосферного давления объяснялся независимым распространением лидеров от каждого из электродов и пробоем между головками лидеров при их сближении. При этом лидер, распространяющийся от плоского электрода, инициировался первичным стримером, который возникал у электрода с малым радиусом кривизны. Кроме того, на фотографии, приведенной в [9], видно, что с обоих лидеров под различными углами распространялось множество стримеров (тонких „нитей“), которые соединяли лидеры или обрывались, не достигая противоположного лидера. Фронт импульса напряжения в этих экспериментах составлял $80 \mu\text{s}$, спад 3 ms, амплитуда 510 kV, а ток разряда ограничивался сопротивлением 1 MΩ. Расстояние между электродами равнялось 1 m.

В недавних работах [10–12] при фронте наносекундного импульса напряжения ~ 0.5 ns на фотографиях диффузных разрядов, формируемых за счет генерации убегающих электронов и рентгеновского излучения, были зарегистрированы изгибы катодонаправленных искровых лидеров под прямым углом. Искровыми лидерами мы называем каналы, которые движутся от одного электрода к другому в сравнительно малых промежутках (от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров). Данные каналы хорошо видны на фоне объемного разряда, инициируемого пучком электронов лавин

(ОРИПЭЛ [10]), который формируется в первой стадии разряда. Изгибы в работах [10–12], в отличие от изгибов, наблюдаемых в работах [8,9], регистрировались на незавершенных катодонаправленных искровых лидерах. При этом ограничительного сопротивления в разрядной цепи не было, и полный ток через промежуток составлял единицы килоампер [12]. Отметим, что при формировании ОРИПЭЛ на катоде с малым радиусом кривизны были видны яркие пятна.

В [10–12] было установлено, что искровой лидер от катодного пятна движется медленно (продвигается за все время горения разряда на несколько миллиметров) и не успевает достигнуть середины промежутка. Скорость катодонаправленного лидера существенно больше. При встрече катодо- и анодонаправленных искровых лидеров, которая происходила у катода, формировался искровой канал. Яркость свечения искрового канала была значительно больше, чем у катодонаправленных искровых лидеров, а изгибы были сглажены. Также резкий изгиб отсутствовал в области встречи искровых лидеров. Однако исследования в работах [10–12] были проведены без фотографирования отдельных стадий разряда с высоким временным разрешением.

Цель настоящей работы — исследовать формирование изгибов на искровых лидерах, наблюдаемых при переходе от ОРИПЭЛ к искровому разряду, в том числе с помощью ССД-камеры.

Экспериментальная аппаратура и методики

В настоящей работе использовались две экспериментальные установки, состоящие из генератора, разрядной камеры и системы регистрации. В установке № 1, как и в работах [10–12], использовался генератор РАДАН-220, формирующий импульсы напряжения с амплитудой

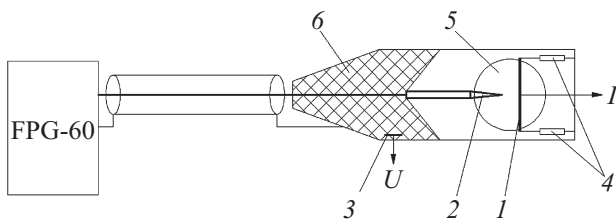


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — анод, 2 — катод, 3 — емкостной делитель, 4 — токовый шунт, 5 — боковое окно, 6 — изолятор.

~ 250 kV, фронтом ~ 0.5 ns и длительностью на полувысоте при согласованной нагрузке ~ 2 ns. Разрядный промежуток был образован трубчатым катодом диаметром 6 mm из фольги толщиной $100 \mu\text{m}$ и плоским анодом. Межэлектродный зазор составлял 12–16 mm. Эксперименты на установке № 1 проводились в режиме однократных импульсов. Регистрация интегральной картины свечения разряда осуществлялась фотоаппаратом SONY A100 через боковое окно перпендикулярно продольной оси промежутка.

Схема экспериментальной установки № 2 приведена рис. 1. На этой установке использовался плоский анод и два различных катода с малым радиусом кривизны. Один катод (трубчатый) был выполнен в виде трубки с заостренной кромкой диаметром 6 mm с толщиной стенок $100 \mu\text{m}$. Второй катод был выполнен в виде конуса с углом у вершины 30° и радиусом округления 0.1 mm. Напряжение на межэлектродном зазоре измерялось с помощью емкостного делителя, ток разряда — с помощью шунта, соединяющего анод с корпусом камеры. Межэлектродный зазор на установке № 2 составлял 2 mm. Импульсы напряжения подавались от генератора FPG-60 [13]. Высоковольтный генератор позволял формировать на высокоомной нагрузке (1–10 k Ω) импульсы напряжения отрицательной полярности амплитудой до 60 kV с фронтом нарастания напряжения 2–3 ns и длительностью на полувысоте 4–5 ns. В данных экспериментах амплитуда падающей волны напряжения составляла 10–20 kV, а частота следования импульсов — 400 Hz. При импульсно-периодическом разряде улучшилась стабильность напряжения пробоя, а за счет уменьшения амплитуды импульса напряжения удалось замедлить развитие отдельных стадий разряда. Разряд фотографировался с помощью четырехканальной CCD-камеры HSFC-PRO, которая с субнаносекундной точностью синхронизировалась с генератором FPG-60. Для регистрации электрических сигналов применялся цифровой осциллограф TDS 3034 (300 MHz, 2.5 Gs/s).

Исследования были проведены при разрядах в неоднородном электрическом поле как в режиме однократных импульсов при напряжении генератора в сотни киловольт (установка № 1), так и при частоте следования импульсов 400 Hz при напряжении генератора в десятки

киловольт (установка № 2). Давления азота, воздуха, аргона и смеси азота с CH_4 составляли в большинстве экспериментов 1 atm.

Результаты измерений

Проведенные эксперименты на установке № 1 подтвердили, что при формировании в неоднородном электрическом поле катодонаправленных искровых лидеров на них видны изгибы, в том числе под прямым углом. На появление катодонаправленных искровых лидеров при ОРИПЭЛ влияют многие факторы. Наиболее важные из них: сорт газа и его давление, величина межэлектродного промежутка, амплитуда, длительность и фронт импульса напряжения, конструкция электродов. Кроме того, наблюдаемая форма разряда изменяется от импульса к импульсу. Наиболее часто на установке № 1 катодонаправленные искровые лидеры, перемикающие более половины промежутка, формировались при прочих равных условиях в смесях азота с небольшими добавками CH_4 . Достаточно легко было подобрать давление и смесь этих газов, чтобы в большинстве импульсов (на $\sim 90\%$ фотографий) из серии в сотню импульсов формировался ОРИПЭЛ только с анодонаправленными искровыми лидерами у катода. ОРИПЭЛ с анодонаправленными искровыми лидерами и одним катодонаправленным искровым лидером формировался с вероятностью $\sim 10\%$. И с малой вероятностью ($< 1\%$) в этих условиях формировался ОРИПЭЛ с искровым каналом, который перемкнул промежуток.

Фотографии интегрального свечения разряда за один импульс с катодонаправленным лидером и с анодонаправленными лидерами у катода приведены на рис. 2. На рис. 2, *a* показана фотография свечения разряда во всем промежутке. Слева виден трубчатый катод и анодонаправленные лидеры у катода. На катодонаправленном лидере видно несколько изгибов, в том числе

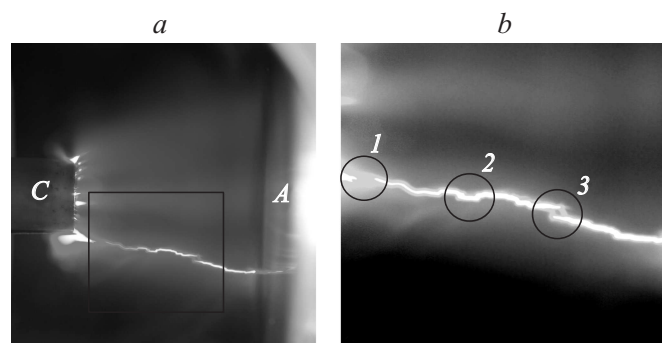


Рис. 2. Фотографии интегрального свечения разряда в азоте при давлении 1.5 atm с добавкой 2 Torr метана. *a* — слева показан трубчатый катод (C), справа плоский анод (A), межэлектродное расстояние 14 mm; *b* — область встречи катодонаправленного и анодонаправленного искровых лидеров (1), один переход между лидерами (2), два перехода между лидерами (3) (увеличенный масштаб).

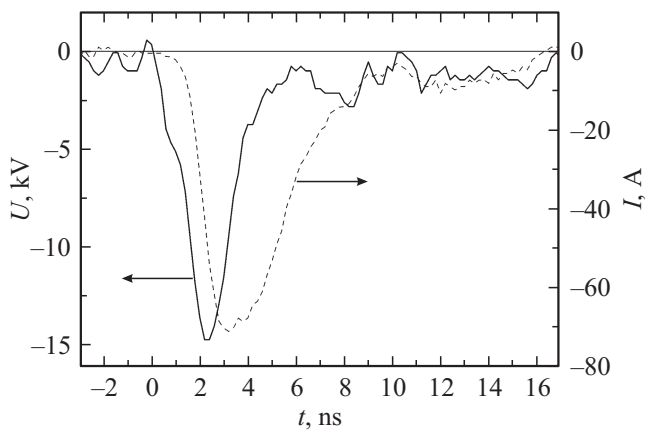


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока разряда в воздухе атмосферного давления при величине разрядного промежутка 2 мм. Конический катод.

под прямым углом. При увеличении масштаба фотографии (рис. 2, *b*) хорошо видны следующие особенности. Во-первых, в области встречи катодонаправленного и анодонаправленного искровых лидеров у катода до образования искрового канала разряд обычно оставался диффузным. В данном импульсе катодонаправленный искровой лидер не успел пересечь промежуток и замкнуться на анодонаправленный искровой лидер. Как видно из рис. 2, *a*, длина анодонаправленных искровых лидеров в этих условиях существенно меньше, чем у катодонаправленного искрового лидера. Во-вторых, переход с одного яркого продольного канала катодонаправленного искрового лидера на другой проходит не только по одному поперечному каналу, но и по двум каналам. При этом расстояние между поперечными каналами может изменяться. Полученные данные согласуются с результатами работ [9–12], в которых также в подобных условиях наблюдались изгибы на катодонаправленных искровых лидерах. Диаметр катодонаправленных искровых лидеров составлял ~ 0.1 мм. Провести съемку различных стадий разряда на установке №1 с помощью CCD-камеры не удалось из-за нестабильной работы обострительного разрядника генератора РАДАН-220. Дальнейшие исследования были проведены на установке №2.

При уменьшении амплитуды напряжения генератора и работе при малых частотах следования импульсов (< 10 Hz) в условиях формирования ОРИПЭЛ увеличилась нестабильность пробоя промежутка, в том числе при начальных напряженностях электрического поля, соответствующих начальным напряженностям электрического поля на установке №1. Поэтому измерения были проведены в импульсно-периодическом режиме. При частоте следования импульсов 400 Hz напряжение пробоя промежутка стабилизировалось, и разброс от импульса к импульсу не превышал 5%. Осциллограммы импульсов напряжения на промежутке и тока разряда

при атмосферном давлении воздуха приведены на рис. 3. Осциллограммы представляют собой усредненные значения тока и напряжения за 128 импульсов при частоте следования импульсов 400 Hz. Амплитуды и длительности импульсов напряжения и тока разряда в азоте аналогичны амплитудам и длительностям в воздухе. Максимальные значения тока разряда в данных газах для разных катодов при одном и том же давлении отличаются менее чем на 10%. Амплитуда тока разряда в аргоне была на $\sim 20\%$ больше, чем в воздухе и азоте при одинаковой амплитуде падающей волны напряжения. Максимальное значение напряжения на разрядном промежутке при использовании трубчатого катода было больше, чем при использовании катода в виде конуса для азота и воздуха на $\sim 30\%$, а для аргона — на $\sim 15\%$.

Из полученных осциллограмм следует, что в течение первых 15 ns после подачи импульса напряжения на промежуток направление тока через промежуток не меняется. Максимальное значение тока через промежуток достигается за ~ 3 ns. Так как разрядная плазма и генератор не были полностью согласованы, то на формирование разряда оказывали влияние отраженные от промежутка и генератора импульсы напряжения, которые приходили на промежуток с задержкой более 15 ns. Съемка с помощью CCD-камеры до четырех кадров за один импульс проводилась как во время первых 15 ns, до прихода отраженного импульса, так и при больших задержках относительно фронта импульса напряжения. Время экспозиции одного кадра обычно составляло 3 ns. Благодаря высокой (субнаносекундной) точности синхронизации импульсного генератора FPG-60 и CCD-камеры также были получены фотографии свечения промежутка во время первой наносекунды после приложения импульса напряжения к промежутку.

Фотографии свечения промежутка в различные моменты времени приведены на рис. 4–7. Установлено, что с обоими катодами в азоте, аргоне и воздухе при атмосферном давлении за время 1 ns формируется диффузный разряд, который заполняет весь промежуток. На рис. 4 приведены фотографии свечения разряда за первую ns, за 2–4 ns и за 5–7 ns. Форма разряда зависит от сорта используемого газа, используемого катода и от конкретного импульса. Более часто в воздухе и аргоне, с меньшей вероятностью в азоте, в течение первой наносекунды в промежутке с конусным катодом наблюдались две или три диффузные струи (рис. 4). Диаметр отдельной струи изменялся от импульса к импульсу. Минимальные диаметры диффузных струй (первичного стримера) и начинающихся формироваться искровых лидеров составляли 0.1–0.2 мм. В ряде импульсов (преимущественно в азоте) и при уменьшении давления разряд был диффузным (рис. 4, *c*). Форма и положение струй, сформировавшихся в течение первой наносекунды, сохранялись в течение следующих 2–4 ns. Отметим, что на установке №2 катодное пятно за время 1 ns при атмосферном давлении азота, аргона и воздуха в большинстве импульсов также успевает

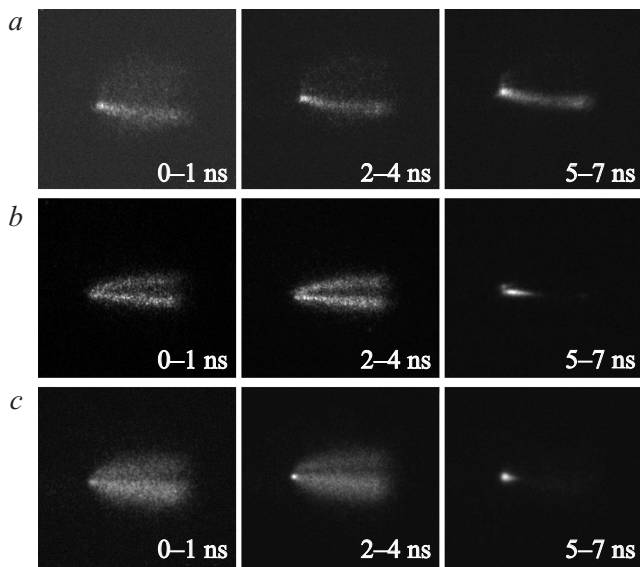


Рис. 4. Фотографии разряда в различные моменты времени при давлении 1 atm: *a* — в аргоне, *b* — в воздухе, *c* — в азоте. Конический катод.

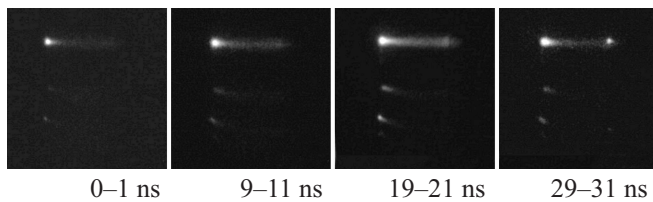


Рис. 5. Фотографии разряда в различные моменты времени при давлении 1 atm в аргоне. Трубочатый электрод.

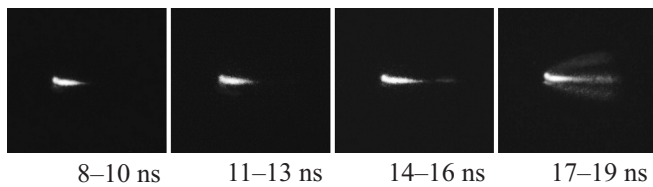


Рис. 6. Фотографии разряда в различные моменты времени при давлении 1 atm в воздухе. Конический электрод.

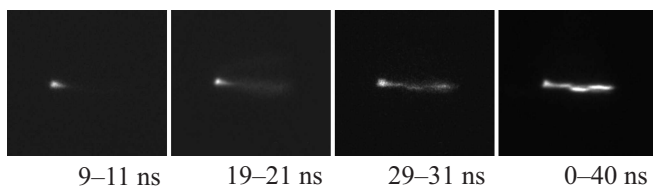


Рис. 7. Фотографии разряда в различные моменты времени и интегральная фотография за первые 40 ns при давлении 1 atm в азоте. Конический электрод.

сформироваться. За первые 7 ns яркие катодные пятна успевали сформироваться с обоими катодами и во всех трех газах (рис. 4–7). Однако формирование ярких анодных пятен за первые 15 ns зарегистрировать не

удалось (рис. 5, 6). Данные исследования показывают более позднее время формирования ярких пятен на плоском аноде при увеличении длительности фронта импульса напряжения.

Формирование анодонаправленного искрового лидера в азоте и воздухе обычно регистрировалось на 5–7 ns свечения разряда и позднее (рис. 4, 6). Катодонаправленные лидеры в течение первых 15 ns на установке №2 зарегистрированы не были. Однако с помощью CCD-камеры на установке №2 были зарегистрированы изгибы на канале, который начинал формироваться в разрядном промежутке (рис. 7).

На рис. 7 приведена фотография свечения разряда, полученная с помощью CCD-камеры во время 29–31 ns после подачи импульса напряжения на промежутке. По длине промежутка видны два продольных диффузных канала диаметром ~ 0.1 mm, которые смещены относительно друг друга на ~ 0.1 mm и имеют сопоставимую интенсивность свечения на разных участках (рис. 7) (29–31 ns). На предыдущем кадре (19–21 ns) отдельных диффузных каналов не видно. Однако на интегральной фотографии за первые 40 ns хорошо виден искровой лидер в стадии перемигания промежутка с двумя изгибами и большей яркостью свечения у плоского электрода.

Обсуждение результатов

Наличие изгибов на искровом лидере при наносекундных разрядах в неоднородном электрическом поле можно объяснить следующим образом. При подаче высоковольтного импульса напряжения на его фронте с катода с малым радиусом кривизны эмитируются первые электроны. Далее формируются лавины, и число электронов в них растет по закону $N = N_0 \exp(\alpha x)$, где α — коэффициент ударной ионизации, x — координата. Известно, что число электронов в каждой из лавин может увеличиться без образования стримера в $\sim 10^8$ раз (критическое число электронов в лавине $N_c \approx 10^8$ электронов) [1]. Расстояние x_c , на котором лавина достигает критического размера в воздухе при атмосферном давлении и напряженности электрического поля ~ 100 kV/cm, согласно $x_c = (\ln N_c)/\alpha$, составляет ~ 0.2 mm [2]. Таким образом, у катода формируются стримеры, которые распространяются к аноду за счет волны ионизации в зоне головки стримера. На фронте волны ионизации имеются избыточный отрицательный, а несколько позади на расстоянии, приблизительно равном длине ионизации α^{-1} , избыточный положительный заряды. Причем концентрация электронов за фронтом волны ионизации (первичном стримере) может достигать 10^{14} электронов, что приводит к ослаблению электрического поля в зоне за фронтом волны ионизации [1]. Если головки отдельных стримеров перекрываются, то в промежутке формируется диффузное плазменное образование из нескольких лавин или стримеров (рис. 4, c), которое также быстро пересекает промежуток.

На расстояниях, превышающих длину ионизации α^{-1} , могут формироваться два и более стримеров, порождающих диффузные токовые каналы. При наносекундной длительности импульса напряжения изгибы на искровых лидерах появляются на более ранних стадиях разряда, чем в работах [7,8], где зарегистрированы изгибы на искровом канале при больших промежутках. В условиях [7,8] образование изгибов обусловлено пробоем между диффузными токовыми каналами или диффузным токовым каналом и катодонаправленным искровым лидером, которые распространяются вдоль различных силовых линий электрического поля. Причем при движении лидеров в [7,8] регистрируется большое число отдельных стримеров и диффузных токовых каналов (диффузных струй).

При наносекундных разрядах в неоднородном электрическом поле разрядные промежутки вначале перемыкаются первичными стримерами, которые образуют диффузные токовые каналы диаметром ~ 0.1 мм, удаленные друг от друга на ~ 0.1 мм и более. Далее при формировании искровых лидеров происходит пробой между отдельными диффузными токовыми каналами из-за различного потенциала в отдельных диффузных токовых каналах (струях). В результате на катодонаправленном искровом лидере наблюдается один или несколько изгибов.

Заключение

Приведенные исследования формирования разряда в воздухе, аргоне, азоте и смеси азота с CH_4 подтвердили, что при повышенных давлениях катодонаправленный искровой лидер может последовательно распространяться по нескольким диффузным токовым каналам, переходя с одного трека на другой. Формирование отдельного трека можно объяснить распространением на начальной стадии разряда первичного стримера от катода. Далее по созданным трекам распространяется катодонаправленный искровой лидер, который может переходить с одного трека на другой. При длительностях фронта импульса напряжения ~ 0.5 и ~ 1.5 нс были зарегистрированы изгибы на искровых лидерах, причем часть изгибов при фронте импульса напряжения ~ 0.5 нс состояла из двух параллельных каналов, которые располагались под прямым углом к продольным осям лидеров.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00105-а.

Список литературы

- [1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издат. Дом Интеллект, 2009. 736 с.
- [2] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [3] Babich L.P. High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: ISTC Science and Technology Series. Vol. 2. Futurepast: Arlington, VA, 2003. 358 p.
- [4] Пучки убегающих электронов и разряды на основе волны размножения электронов фона в плотном газе / Под ред. Яковленко С.И. Труды ИОФАН. М.: Наука, 2007. Т. 63. 186 с.
- [5] Осипов В.В. // УФН. 2000. Т. 170. № 3. С. 225–245.
- [6] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. Вып. 9. С. 953–971.
- [7] Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F. // Int. Rev. Phys. 2012. Vol. 6. N 2. P. 165–195.
- [8] Norinder H., Salka O. // Ark. Fys. 1952. Vol. 5. N 24. P. 493–529.
- [9] Larsson A. // IEEE Trans. Plasm. Sci. 2011. Vol. 39. N 11. P. 2212–2213.
- [10] Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Шутыко Ю.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 151–154.
- [11] Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Yan P., Kozurev A.V., Bakst E.Kh. // J. Appl. Phys. 2012. Vol. 111. P. 023304.
- [12] Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А. // ЖТФ. 2012. Т. 83. Вып. 8. С. 29–35.
- [13] Efanov V.M., Efanov M.V., Komashko A.V., Kriklenko A.V., Yarin P.M., Zazoulin S.V. // Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9. 2010. Part 5. P. 301–305.