УДК 535.37+778.663

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАВИН И СТРИМЕРОВ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Бойченко А.П.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет Минобрнауки России», Краснодар, e-mail: bojchenco@yandex.ru

На примере галогенсеребряных фотопленок ILFORD PAN100 и фототехнической ФТ-41П проведены исследования зарегистрированных на них электронных лавин и стримеров – «фигур Лихтенберга» барьерного газового разряда, возбуждаемого одиночными видеоимпульсами колоколообразной формы и разной полярности (на высоковольтном металлическом электроде) с длительностью $1{,}3\cdot10^{-5}$ с, а также радиоимпульсом частотой заполнения 833 Гц и длительностью $\sim1{,}3\cdot10^{-2}$ с, амплитуда которого затухает по экспоненциальному закону. Впервые показана неоднородность внутренней структуры электронных лавин, выраженная в виде колец различной оптической плотности и градиентов их контрастности. Экспериментально установлены режим и условия разрушения стримеров, распадающихся в форме веера, на основе чего высказано предположение об одноименном электрическом заряде продуктов их распада.

Ключевые слова: барьерный газовый разряд, диэлектрик, фотоматериал, стримеры, электронные лавины

PHOTOGRAPHIC RESEARCHES STRUCTURE OF ELECTRONIC AVALANCHES AND STREAMERS BARRIER GAS-DISCHARGE

Boychenko A.P.

Kuban State University, Krasnodar, e-mail: bojchenco@yandex.ru

On an example halogen silver of films ILFORD PAN100 and phototechnical FT-41P the researches of the electronic avalanches, registered on them, and streamers – «figures Lichtenberg» of the barrier gas-discharge raised by single videopulses bell-figurative of the form and different polarity (on a high-voltage metal electrode) with duration $1{,}3\cdot10^{-5}$ s are carried and also radiopulse by frequency of filling 833 Hz and duration $\sim1{,}3\cdot10^{-2}$ s, which amplitude fades on exhibitor to the law. Heterogeneity of internal structure of electronic avalanches expressed as rings of various optical density and gradients of their contrast for the first time is shown. The mode and conditions of destruction streamers, fan, breaking up in the form is experimentally established. On the basis of that the assumption of the same electrical charge of products of their disintegration is stated.

Keywords: barrier gas-discharge, dielectric, photomaterial, streamers, electronic avalanches

Развивающийся в электроизоляционном материале высоковольтных установок барьерный газовый разряд (БГР) представляет одну из актуальных проблем техники высоких напряжений (ТВН), т.к. приводит к преждевременному «старению» изоляции и ее последующему разрушению [1, 2]. В настоящее время наибольшее распространение для исследования БГР получил осциллографический метод. С его помощью удается оценивать величины многих параметров разряда, начиная от напряжения его зажигания и заканчивая энергией разрушающего воздействия на электроизоляционный материал. Несмотря на простоту и доступность осциллографического метода, он не позволяет определять спектрально-оптические, структурные и пространственно-временны́е характеристики БГР. Частично эту задачу удается решать фотоэлектрическими и электронно-оптическими методами. Однако из-за низкой интенсивности свечения и малой длительности разряда они оказываются технологически трудоемкими, конструктивно габаритными и дорогими. Кроме того, сам приемник излучения располагается на определенном расстоянии от зоны горения разряда, что требует дополнительного усиления яркости его изображения.

Несмотря на то, что еще в XIX в. была продемонстрирована возможность фотографической регистрации разряда на галогенсеребряные (AgHal) материалы [3] путем их непосредственного размещения в зоне газоразрядных процессов, этот метод не получил широкого распространения в ТВН, т.к. по мнению ряда авторов (например [1]) «клидонография» – способ газоразрядного фотографирования дает большую погрешность получаемых результатов [1]. Библиографический анализ проблемы показал, что причина этого заключена в отсутствии фундаментальных физических представлений о процессах, протекающих под действием БГР в самом фоточувствительном материале, его эмульсионных микрокристаллах (МК) AgHal. Поэтому в ряде работ авторами такие исследования были проведены [3–5], где показано, что взаимодействующий с AgHal-фотоматериалом БГР приводит к реализации «Эффекта Ротштейна» и дифференциации чувствительности фотоэмульсионных МК AgHal к полярности приложенного напряжения, частоты или длительности его изменения, и особенно к количеству разрядных импульсов, генерирующих световое излучение. Также установлено, что ранее обнаруживаемый разброс

результатов фотографической регистрации БГР есть следствие очень сильного изменения светочувствительности одного и того же фотоматериала в зависимости от моментов возникновения разрядных импульсов относительно времени изменения электрического поля, созданного в газоразрядном промежутке. Опираясь на установленные закономерности, в настоящей работе ставилась цель визуализировать и исследовать внутреннюю структуру электронных лавин и стримеров БГР, возбуждаемого импульсным и переменным импульсным напряжением.

Материалы и методы исследования

Для фотографирования разряда использовались следующие AgHal-фотопленки: средней светочувствительностью PAN100 (фирма «ILFORD») и фототехническая низкой чувствительностью ФТ-41П (производство ОАО «Тасма», г. Казань). Первая фотопленка предназначалась для фоторегистрации газоразрядных процессов, возбуждаемых одиночными колоколообразными видеоимпульсами напряжения разной полярности (относительно электрода, на котором расположен фотоматериал) и длительностью ~$1{,}3\cdot10^{-5}$ с (на уровне 0,1), а вторая – радиоимпульсами с затухающей по экспоненте амплитудой, частотой их заполнения 833 Гц и длительностью ~$1{,}3\cdot10^{-2}$ с. Необходимость использования фотопленок разной светочувствительности для различных режимов возбуждения БГР определялась из того факта, что при однополярных видеоимпульсах микросекундной длительности интенсивность горения разряда оказывается значительно меньше, чем при его возбуждении радиоимпульсами (в нашем случае импульсным переменным напряжением). Названные фотопленки одновременно служили диэлектрическими барьерами, что обеспечивали их полимерные подложки из полиэтилентерефталата, а разряд возбуждался в воздухе атмосферного давления с контролируемыми термодинамическими параметрами и химическим составом на газовом хроматографе. Для обеспечения формирования БГР одновременно в лавинной и стримерной формах в конденсаторной системе высоковольтный электрод Роговского располагался над эмульсионным слоем фотопленок на некотором расстоянии, образуя газоразрядный промежуток. Его величина составляла ~$3{,}5\cdot10^{-4}$ м, при которой лавинно-стримерный режим горения разряда наиболее вероятен [6]. Кроме того, для облегчения пробоя газа и локализации элементов разряда поверхность высоковольтного электрода делалась неоднородной с выступами и впадинами величиной порядка до $2{,}5\cdot10^{-5}$ м. Одновременно с фотографированием БГР велась осциллографическая регистрация его напряжения и интегрального тока. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Здесь 1 – высоковольтный электрод Роговского диаметром $1{,}1\cdot10^{-2}$ м, выполненный из стали; 2 – такой же заземленный электрод Роговского из латуни диаметром $2{,}2\cdot10^{-2}$ м и полированной поверхностью; 3 – газоразрядная камера; 4 – полимерная подложка AgHal-фотопленки с ее фоточувствительным эмульсионным слоем 5, 6 – газоразрядный промежуток; 7 – генератор высоковольтных импульсов; 8 – виртуальный осциллограф PCS500 фирмы «Velleman» с емкостным делителем напряжения 9 (описаны в [5]) и образцовым безындукционным сопротивлением $R = 0{,}82 \pm 0{,}03$ Ом – 10 для регистрации интегрального тока БГР.

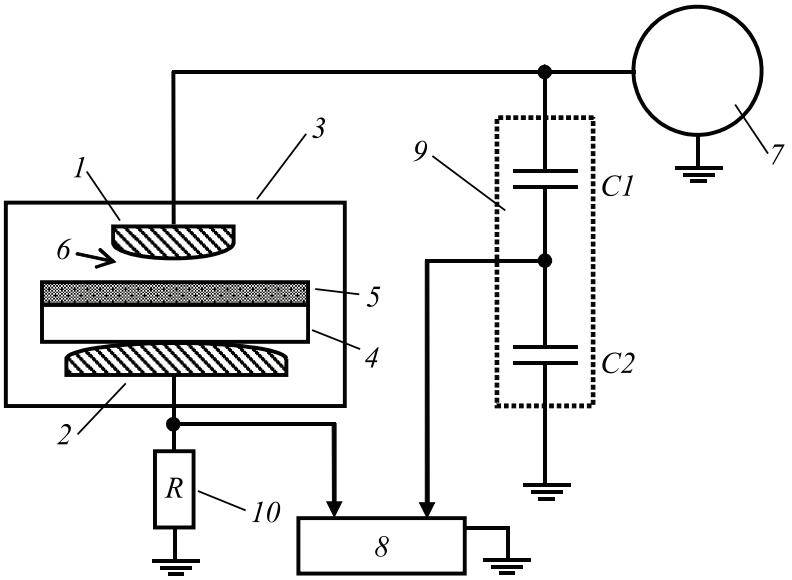

Рис. 1. Схема экспериментальной установки для фотографирования и осциллографирования БГР (обозначения в тексте)

После газоразрядного экспонирования фотопленок осуществлялась их химико-фотографическая обработка в регламентируемых производителями обрабатывающих растворах. Фотопленка PAN100 проявлялась в мелкозернистом проявителе D-76, а ФТ-41П – в контрастном проявителе ФТ-2. Полученные на них изображения исследовались визуально и под микроскопом с увеличением до 50 крат, а наиболее информативные снимки переводились в электронный вид с помощью стандартных оптико-цифровых средств. На рис. 2 и 3 представлены газоразрядные фотографии БГР, возбуждаемого видео- и радиоимпульсами с осциллограммами его напряжения и интегрального тока, а изображения с ха-

рактерными элементами структуры электронных лавин разряда представлены в увеличенном виде вкладками к основным фотографиям.

Результаты исследования и их обсуждение

Приступая к анализу полученных изображений, отметим, что полярности напряжений на высоковольтном электроде определены такими, как это принято для клидонографии в ТВН [1], и отличаются от определенных нами в работах [3–5] по исследованию процессов в МК AgHal под действием БГР. На рис. 2а запечатлен БГР, полученный при видеоимпульсе положительной полярности на высоковольтном электроде, а на рис. 2б – при отрицательной. Соответствующие разряду осциллограммы напряжения (нижняя осциллограмма) и интегрального тока (верхняя осциллограмма) представлены на рис. 2в и 2г.

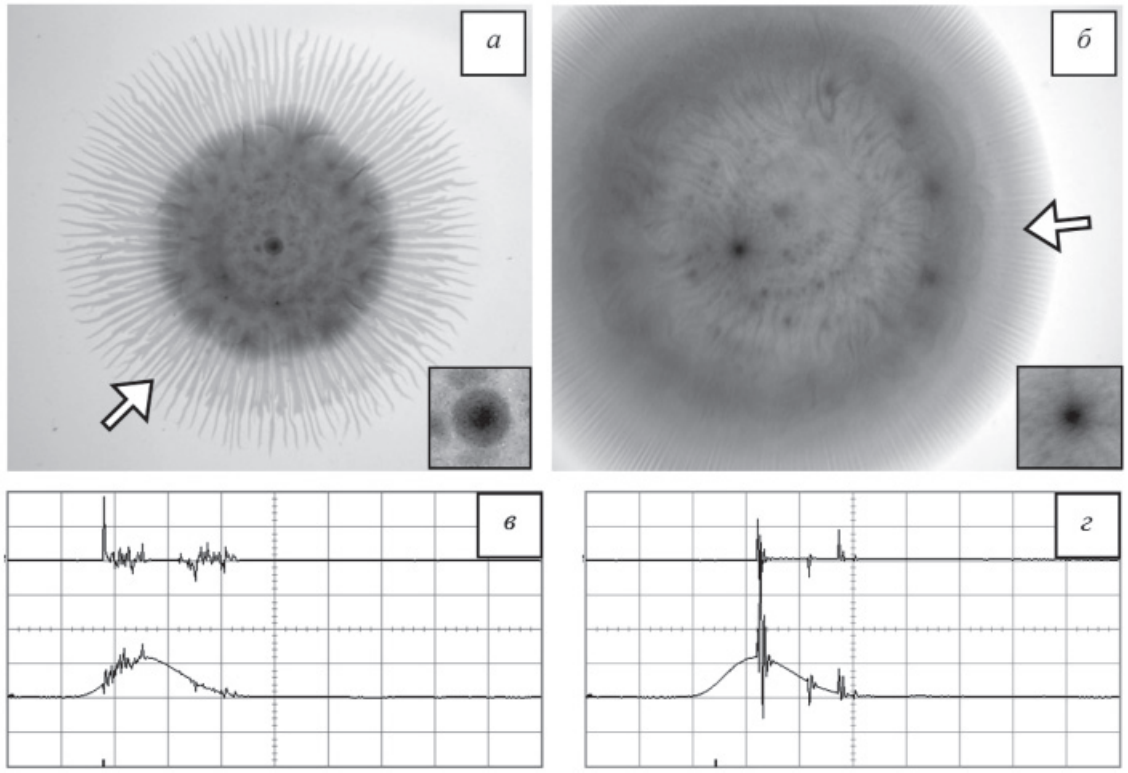

Рис. 2. Негативные газоразрядные фотографии (клидонограммы) БГР, полученные при видеоимпульсах положительной (а) и отрицательной (б) полярности и соответствующие разряду осциллограммы (в) и (г). Масштаб: одна клетка по оси ординат для напряжения БГР (нижняя осциллограмма) – $1{,}1\cdot10^4$ В и для его интегрального тока (верхняя осциллограмма) – 1,83 А; одна клетка по оси абсцисс – $5\cdot10^{-6}$ с. Вкладки: увеличенные фронтальные изображения электронных лавин для (а) – 34; для (б) – 30 (описание в тексте)

На рисунках видны типичные для соответствующих полярностей напряжения картины распределения стримеров, в совокупности образующих фигуры Лихтенберга. Важно отметить, что для разрядных стримеров при «положительном» напряжении, они не сливаются между собой, что указывает на одноименный знак электрического заряда, распределенный по их телу. Однозначно сказать о такой закономерности для «отрицательных» стримеров затруднительно, т.к. они очень близко расположены друг к другу и, по-видимому, для ответа на этот вопрос придется использовать фотоматериалы с высокой разрешающей способностью (не менее 250 линий на миллиметр). Для обеих разновидностей стримеров при исследованной величине напряжения $1{,}32\cdot10^4$ В характерно их продолжение за пределы границ заземленного электрода. Этим границам соответствуют резкие скачки (градиенты) оптической плотности стримеров, в совокупности образующих характерные кольца (показаны стрелками на рис. 2а и 2б), особенно отчетливо проявляющиеся при импульсах положительной полярности. Кольцевая структура была обнаружена и внутри электронных лавин (см. вкладки на рис. 2а и 2б), также зависящая от полярности напряжения, что обнаружено впервые. Так, при видеоимпульсе положительной полярности электронные лавины имеют двухкольцевую

структуру с резко очерченными границами между ними. При этом первое, центральное кольцо создает на AgHal-фотоматериале наибольшую интегральную оптическую плотность по сравнению со вторым окружающим его кольцом. Из чего следует, что внутри лавины сосредоточена наибольшая концентрация электрически заряженных частиц, взаимодействие которых друг с другом и/или нейтральными атомами (молекулами) газа рождает большое количество фотонов преимущественно ультрафиолетовой области электромагнитного спектра, на что указывают резкие границы колец как результат сильного поглощения данных фотонов плазменной средой и фоточувствительным слоем регистрирующего материала. Этот вывод согласуется с результатами экспериментов других авторов [6, 7]. Подобная структура лавин наблюдается при импульсе отрицательной полярности, но второе кольцо на периферии имеет диффузный характер со слабо выраженной лучевой структурой. Отметим, что описанные нами изображения структуры электронных лавин противоположны по контрастности опубликованным авторами [6], т.к. для их регистрации они использовали несеребряные фотоматериалы, которые экспонировались 20–80 с БГР при переменном напряжении 24 кГц.

Как видно из осциллограмм рис. 2в и 2г, при данной величине напряжения горение разряда носит многоимпульсный характер, несмотря на то, что он возбуждается одиночными высоковольтными импульсами. Причем на импульсах положительной полярности этот процесс начинается на уровне ~0,2 переднего фронта напряжения, а на импульсах отрицательной полярности – на максимуме его амплитуды. Наблюдаемая закономерность подтверждает ранее полученные результаты подобных исследований [4] и объясняется существенным различием эмиссионных характеристик диэлектрического и металлического электродов. Кроме того, многоимпульсный характер горения БГР как в лавинном, так и стримерном режиме является дополнительным подтверждением реализации «Эффекта Ротштейна» на AgHal-фотоматериалах при их многократном экспонировании световыми вспышками от разряда в импульсном электрическом поле большой напряженности [5].

Среди древовидных фигур Лихтенберга БГР было обращено внимание на веерообразные (см. рис. 2а) и высказано предположение о причине их образования как результате распада стримеров и увеличения вероятности протекания этого процесса с возрастанием длительности высоковольтных видеоимпульсов или уменьшением частоты заполнения радиоимпульсов. Поэтому получение и исследование таких фигур проводилось на последних, что одновременно позволило установить формирование веерообразных стримеров с четко выраженной лучевой структурой только при положительных полупериодах переменного напряжения, длительность которого в наших экспериментах составляла ~$1{,}3\cdot10^{-2}$ с. Зафиксированное на ФТ-41П изображение описанного стримера БГР представлено на рис. 3 с осциллограммой возбуждающего разряд радиоимпульса напряжения и тока его горения.

На рис. 3а четко видна структура веерообразного стримера и динамика его формирования. Начинаясь у высоковольтного электрода, стример имеет утолщенное основание, из которого выделяется яркосветящийся канал, по длине превышающий соседние стримеры, и заканчивающийся диффузно выраженной головкой той же яркости, окруженной радиально расположенными лучами. Важно отметить, что лучи начинаются на расстоянии, приблизительно равном диаметру головки, и не имеют точек пересечения между собой, что указывает на одноименный знак их электрического заряда. Зафиксированные фотопленкой и представленные на заднем плане снимка «лепестки веера» (помечены стрелками на рис. 3а) свидетельствуют, что процесс распада стримера носит объемный характер. Этому процессу соответствует импульс тока разряда амплитудой 0,35 А, тогда как остальным стримерам нитевидной формы соответствует ток, не превышающий $9\cdot10^{-2}$ А, что видно из верхней осциллограммы рис. 3б. Как предполагалось, ток разряда указанной амплитуды для веерообразного стримера возникал лишь на положительных полупериодах переменного напряжения, что видно при сопоставлении верхней и нижней осциллограмм. В противном случае стримеры не имели веерообразной структуры.

Заключение

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сказать, что при определенной разработке и проведении масштабных фундаментальных исследований процессов взаимодействия БГР с различными AgHal-фотоматериалами фотографический метод может существенно дополнить осциллографический и электронно-оптический не только в ТВН, но и различных технических и технологических приложениях физики плазмы, особенно в тех случаях, когда требуется непосредственное размещение регистрирующего устройства в зоне газоразрядных процессов. Как впервые пока-

зано в настоящей работе, фотографическим методом удается визуализировать неоднородность внутренней структуры электронных лавин и, как следствие этого, – неоднородности образующихся из них стримеров, формирование и разрушение которых подчинено определенным закономерностям, в частности, зависящим от полярности приложенного напряжения к газоразрядно-фотографической системе конденсатора.

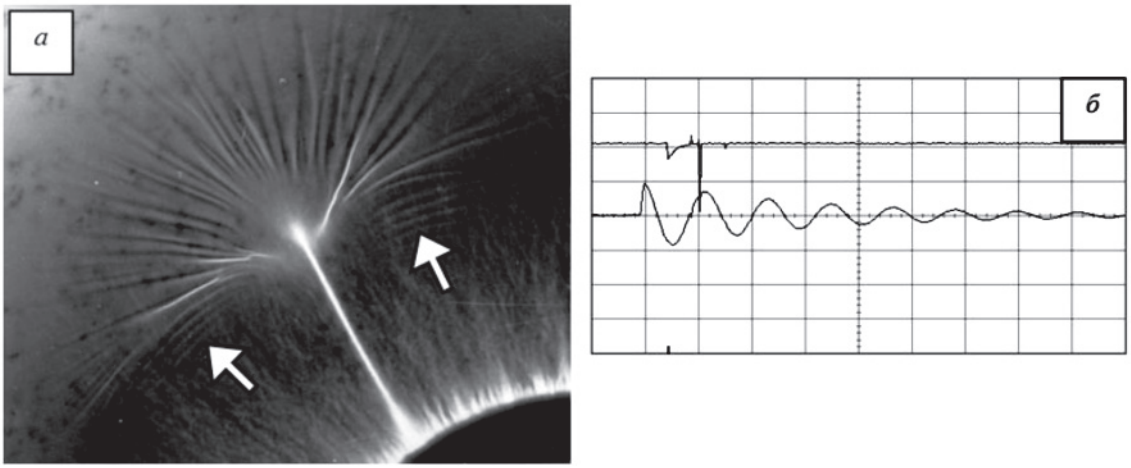

Рис. 3. Увеличенный (3,7) фрагмент газоразрядной фотографии (позитивное изображение) распадающегося стримера БГР, полученного при радиоимпульсе напряжения (а) и соответствующая ему осциллограмма (б). Масштаб: одна клетка по оси ординат для напряжения БГР (нижняя осциллограмма) – $1{,}1\cdot10^4$ В и для его интегрального тока (верхняя осциллограмма) – 0,18 А; одна клетка по оси абсцисс – 10^{-3} с (описание в тексте)

Список литературы

1. Бабиков М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С. Техника высоких напряжений. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 670 с.

2. Sokolova M.V. Some aspects of an air discharge in a plane gap with dielectric on the electrode // Phenomena in ionized gases: Proc. 15th Intern. Conf. Part II. – Minsk, 1981. – P. 543–545.

3. Бойченко А.П., Шустов М.А. Основы газоразрядной фотографии. – Томск: Изд-во «STT», 2004. – 316 с.

4. Бойченко А.П., Хонякин С.В. Исследование влияния составляющих излучения барьерного разряда на формирование газоразрядных изображений // Научные итоги 2011 года: достижения, проекты, гипотезы: матер. I Междунар. научно-практич. конфер. Ч. 2. (Новосибирск, 26 дек. 2011 г.) – Новосибирск, 2011. – С. 39–43.

5. Бойченко А.П. Воздействие барьерного разряда лавинной формы на галогенсеребряный фотоматериал при заблокированной ионной проводимости // ФТП. – 2012. – Т. 46, № 4. – С. 525–529.

6. Дежкунова С.В., Зацепин Н.Н., Сырец О.Ф. Структура искровых каналов при разряде в узких промежутках // Вестник АН БССР. – 1988. – № 3. – С. 87–89.

7. Омаров О.А., Рухадзе А.А. О проявлении плазменной стадии развития лавины при искровом пробое газов // ЖТФ. – 1980. – Т. 50, № 3. – С. 536–539.

References

1. Babikov M.A., Komarov N.S., Sergeev A.S. Tehnika vysokih naprjazhenij. M., L.: Gosjenergoizdat, 1963. 670 p.

2. Sokolova M.V. Some aspects of an air discharge in a plane gap with dielectric on the electrode // Phenomena in ionized gases: Proc. 15th Intern. Conf. Part II. Minsk, 1981. pp. 543–545.

3. Boychenko A.P., Shustov M.A. Osnovy gazorazrjadnoj fotografii. Tomsk.: Izd-vo «STT», 2004. 316 p.

4. Boychenko A.P., Honjakin S.V. Issledovanie vlijanija sostavljajuwih izluchenija bar'ernogo razrjada na formirovanie gazorazrjadnyh izobrazhenij // Nauchnye itogi 2011 goda: dostizhenija, proekty, gipotezy: Mater. I Mezhdunar. nauchno-praktich. konfer. Ch. 2. (Novosibirsk, 26 dek. 2011 g.) Novosibirsk, 2011. pp. 39–43.

5. Boychenko A.P. Vozdejstvie bar'ernogo razrjada lavinnoj formy na galogenserebrjanyj fotomaterial pri zablokirovannoj ionnoj provodimosti // FTP. 2012. T. 46, no. 4. pp. 525–529.

6. Dezhkunova S.V., Zacepin N.N., Syrec O.F. Struktura iskrovyh kanalov pri razrjade v uzkih promezhutkah // Vestnik AN BSSR. 1988. no. 3. pp. 87–89.

7. Omarov O.A., Ruhadze A.A. O projavlenii plazmennoj stadii razvitija laviny pri iskrovom proboe gazov // ZhTF. 1980. T. 50, no. 3. pp. 536–539.

Рецензенты:

Дерябин М.И., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры общей физики Ставропольского государственного университета, г. Ставрополь;

Богатов Н.М., д.ф.-м.н., профессор, зав кафедрой физики и информационных систем Кубанского государственного университета, г. Краснодар.

Работа поступила в редакцию 23.07.2012.