

# НАНОСЕКУНДНЫЕ МИКРОРАЗРЯДЫ В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ

*В. А. Любимцева, А. Е. Дубинов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Разработаны, изготовлены и исследованы многослойные структуры, в которых генерируются наносекундные приповерхностные микроразряды. В этих структурах слои выполнены в виде тонких прозрачных пленок, и плазменный канал разряда формируется в тонких щелях между слоями. При этом переход канала разряда из одного слоя в соседний слой осуществляется через заранее изготовленные микроотверстия. Были получены изображения микроразрядов, подтвердившие, что их плазменные каналы формируются по заданному с помощью отверстий маршруту. При этом маршрут может проходить по достаточно сложной схеме, иметь точки самопересечения и участки, в которых электроны обязаны двигаться против электрического поля. При изучении формы каналов в многослойных структурах обнаружен новый физический эффект, который заключается в азимутальной самоориентации канала разряда при прохождении его от одного микроотверстия к другому микроотверстию.

## Введение

Новая важная тенденция в развитии физики и техники электрических разрядов высокого давления наблюдается в последние годы. Она заключается в уменьшении продольных размеров разрядов до микронных и даже меньших размеров. Можно утверждать, что фактически уже сформировалось новое направление – физика и техника микроразрядов [1–4]. Указанная тенденция отражена, например, в программной статье «Плазменная дорожная карта 2012» [5].

Известные устройства генерации микроразрядов различаются по конструкции и принципу действия. Так, в обзоре [1] рассмотрены устройства на основе прямоточных искровых разрядов, разрядов с полым микрокатодом, диэлектрических барьерных разрядов, коронных микроразрядов, емкостных и индукционных ВЧ-разрядов, а также электродных СВЧ-разрядов. В другом обзоре [2] вместе с перечисленными выше рассматриваются также устройства на основе прямоточных поверхностных разрядов. Хорошо известно, что поверхностные разряды требуют меньших напряжений для зажигания, чем объемные разряды, они удобны для исследования и визуализации.

Примеры устройств генерации поверхностных микроразрядов различного назначения представлены

в работах [2, 6–9]. Описанные там устройства были выполнены в виде чипов, в которых электроды изготавливались путем осаждения паров металлов (Cu, Au, и др.) через трафарет на стеклянную, пластиковую или керамическую подложку. Понятно, что процесс изготовления подобных чипов может занимать несколько дней и является весьма трудоемким и затратным. Кроме того, в чипах имеется еще один недостаток: в них исключена возможность регулирования размеров и формы межэлектродного промежутка.

В недавних работах [10–12] описаны простые в изготовлении и недорогие устройства для генерации микроразрядов вдоль поверхности бумаги. Процесс изготовления электродов на поверхности бумаги заключается в нанесении проводящей краски по заданному рисунку электродов. Несмотря на простоту их изготовления, эти устройства имеют некоторое неудобство в работе: они позволяют осуществлять подсветку обрабатываемых плазмой образцов и визуализацию плазмы только с одной стороны, так как бумага непрозрачна.

В работах нашей группы [13–16] разработана техника простых и недорогих устройств для изучения поверхностных наносекундных микроискр. Эти устройства сделаны на поверхности стандартного предметного стекла и имеют электроды, вырезанные из алюминиевой фольги.

В данной работе в развитии этой техники были разработаны, изготовлены и исследованы многослойные разрядные структуры, в которых генерируются приповерхностные наносекундные микроразряды. В этих структурах слои выполнены в виде тонких прозрачных пленок, и канал разряда формируется в тонких щелях между слоями. При этом переход канала разряда из одного слоя в соседний слой осуществляется через заранее изготовленные микроотверстия. Развитая техника позволяет наблюдать каналы микроразрядов одновременно во всех слоях с обеих сторон.

При изучении наносекундных разрядов в описанных здесь структурах был обнаружен новый физический эффект, который заключается в азимутальной самоориентации канала разряда при прохождении его от одного микроотверстия к другому микроотверстию. Этот эффект представляется нами как некоторое трехмерное обобщение ориентирования плазменных каналов, ранее наблюдавшегося в двумерных лабиринтах [17, 18].

## Экспериментальное оборудование

Для генерирования микроразрядов так же, как и в работах [13–16], в качестве генератора использовалась бытовая искровая пьезоэлектрическая зажигалка JZDD-17-R. Генератор выполнен в удобной для оператора форме пистолета (рис. 1). Он имеет коаксиальный выход. Было измерено, что, например, при межэлектродном расстоянии  $\sim 1$  мм генератор выдает высоковольтные импульсы с длительностью 50 нс, амплитудой холостого хода  $\sim 2,5$  кВ, ток разряда имеет амплитуду  $\sim 10$ – $40$  А на различных нагрузках, а электрическая энергия разряда  $< 0,5$  мДж. На рис. 2 показаны типичные осциллограммы импульса напряжения и тока разряда.



Рис. 1. Генератор наносекундных импульсов JZDD-17-R

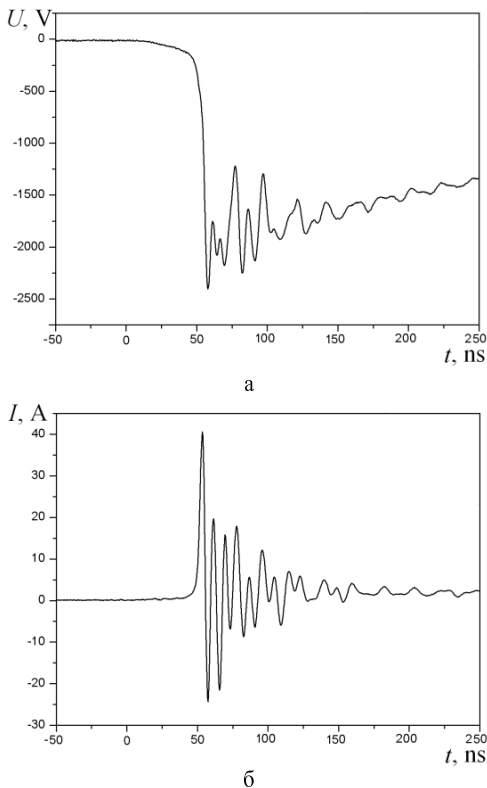


Рис. 2. Типичные осциллограммы: а – напряжения, б – тока разряда, формируемые генератором JZDD-17-R

Для невооруженного глаза наносекундные микроразряды видны как мгновенные точечные искры. Для детальной визуализации каналов микроразрядов использовался оптический микроскоп Levenhuk D50L NG, оснащенный цифровой видеокамерой DEM200. Максимальное увеличение оптической системы микроскопа составляет  $640\times$ , а с дополнительной линзой Барлоу (Barlow) –  $1280\times$ . Получаемые изображения имеют высокое разрешение  $1600\times 1200$  пикселей.

Генератор импульсов и видеокамера микроскопа не имеют взаимной синхронизации, поэтому регистрация разряда велась в режиме видео с частотой кадров  $\leq 7$  кадров/с.

Для создания многослойных разрядных структур нам понадобилось несколько тонких и прозрачных диэлектрических пленок, в каждой из которых находилось бы по одному микроотверстию.

В качестве материала была выбрана полиэтиленовая пленка толщиной 10 мкм.

Для изготовления отверстия в каждой такой пленке была изготовлена вспомогательная разрядная ячейка. Она собиралась следующим образом. Сначала на поверхности стандартного предметного стекла с размерами сторон  $1''\times 3''$  и толщиной 1 мм размещался электрод, вырезанный из алюминиевой фольги толщиной 14 мкм обычными бытовыми ножницами в форме клина с углом  $\sim 50^\circ$ . Этот электрод, как правило, служил анодом. Затем прикладывалась полиэтиленовая пленка с размерами, меньшими размеров стекла. После этого к пленке прикладывался другой клиновидный электрод из алюминиевой фольги так, чтобы расстояние между вершинами электродов было равно 200–400 мкм. И, наконец, все это покрывалось еще одним предметным стеклом. Получившийся таким образом сэндвич плотно обжимался и обвязывался скотчем.

На электроды, находящиеся вдоль разных поверхностей пленки, подавался один или несколько импульсов от генератора JZDD-17-R. При этом разрядная ячейка находилась в воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре. После одного импульса в пленке возникал электрический пробой. В результате пробоя в пленке образовывалось круглое микроотверстие диаметром  $\sim 30$  мкм. Положение микроотверстия – случайное, где-то между катодом и анодом. Последующие импульсы лишь увеличивали диаметр микроотверстия и не приводили к возникновению других отверстий.

На рис. 3 а–з показан процесс возникновения круглого микроотверстия в пленке в результате электрического пробоя.

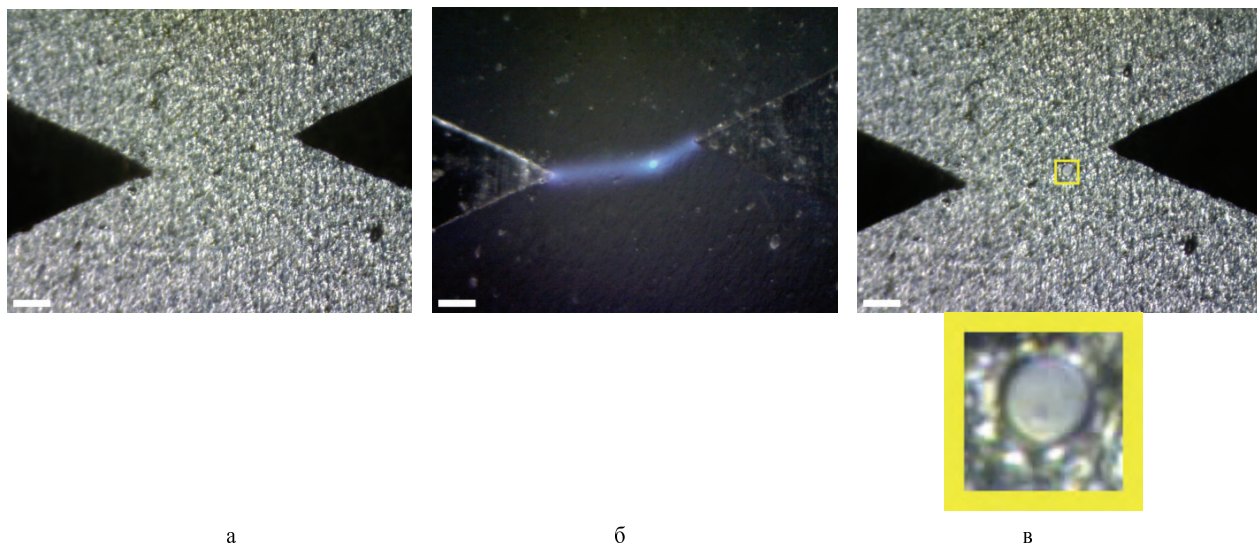


Рис. 3. Процесс возникновения круглого микроотверстия в полиэтиленовой пленке: а – исходное состояние пленки до разряда (подсветка пленки снизу включена, видна зернистая структура полиэтилена); б – пробой пленки электрическим разрядом (съемка в темноте); в – конечное состояние пленки после разряда с микроотверстием (подсветка пленки снизу включена, внизу – увеличенный вырезанный фрагмент); на всех фото – катод слева, отрезок в левом нижнем углу – 100 мкм.

### Экспериментальные результаты

Переходим к описанию основных результатов данной работы по формированию разрядов в многослойных структурах в форме  $N$ -звенных ломаных. Для этого изготавливались многослойные структуры так же, как и в предыдущем случае при изготовлении отверстий.

Последовательность действий показана на рис. 4. Сначала на поверхности предметного стекла размещался электрод, выполненный из алюминиевой фольги. Затем прикладывалась  $(N-1)$  полиэтиленовые пленки с заранее изготовленными микроотверстиями так, чтобы эти микроотверстия определяли заданный  $N$ -звенный маршрут канала разряда. После этого к верхней пленке прикладывался другой клиновидный электрод из алюминиевой фольги. И, наконец, все это покрывалось еще одним предметным стеклом. Получившийся таким образом сэндвич плотно обжимался и плотно обвязывался скотчем.

Укажем, что все описанные здесь структуры недороги, так как в них использованы бытовые материалы. Цена генератора JZDD-17-R не превышает \$2. Каждая ячейка изготовлялась в течение нескольких минут вручную без каких-либо механических манипуляторов и механизмов.

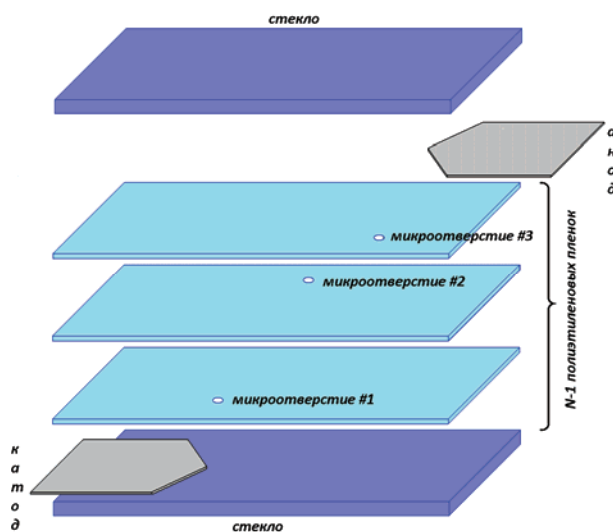


Рис. 4. Последовательность изготовления многослойной разрядной структуры.

На рис. 5а–5е мы приводим в качестве примера шесть схем различных маршрутов (слева) и соответствующие им шесть изображений каналов (справа) однократных наносекундных поверхностных микро-разрядов. Эти изображения получены в темноте, в воздухе при атмосферном давлении и при комнатной температуре.

На рис. 5а показан разряд с *V*-образным каналом, полученный согласно самой простой схеме – с одной пленкой.

На рис. 5б показан разряд с *Z*-образным каналом, полученный с помощью двух пленок. Канал формируется таким образом, что электроны в нем двигаются не по электрическому полю от катода к аноду, а по другому маршруту – сначала к микроотверстию #1 в первой пленке, затем, пройдя через это микроотверстие, к микроотверстию #2 во второй пленке, и уж потом – к аноду. В [17] обнаружено, что разряд может формироваться так, что на определенном участке стример может двигаться перпендикулярно электрическому полю. Здесь же мы видим, что формирование *Z*-образного канала на среднем звене может быть направлено почти против направления на анод.

На рис. 5в показан разряд с *X*-образным каналом, полученный также с помощью двух пленок. Канал разряда здесь имеет средний участок, направленный против поля. Кроме этого, канал разряда имеет одну точку самопересечения.

На рис. 5г показан разряд с *W*-образным каналом, полученный с помощью трех пленок.

На рис. 5д показан разряд с звездно-образным каналом, полученный также с помощью трех пленок. Этот канал имеет три точки самопересечения.

На рис. 5е показан разряд со сложным каналом, полученный с помощью четырех пленок. Этот канал имеет две точки самопересечения и два звена, на которых электронам необходимо двигаться против поля.

На всех фото – катод слева, отрезок в левом нижнем углу – 100 мкм.

Понятно, что, увеличивая количество пленок, можно и далее усложнять геометрию плазменных каналов.

Если предположить, что в нашей многослойной разрядной структуре форма канала разряда определяется траекторией стримера, то следует обратить внимание на проявившийся здесь новый эффект. Он заключается в следующем. Всякий раз, когда стример должен проходить сквозь пленку через микроотверстие, он должен затем сориентироваться и двигаться к следующему микроотверстию по кратчайшему пути. Этот путь, как мы увидели, часто не совпадает с направлением электрического поля, и даже иногда может быть направлен против поля. Но стример, все-таки, сразу же выбирает правильное направление к следующему микроотверстию. Эта азимутальная самоориентация стримеров (а, следовательно, и плазменных каналов) разрядов является основным, обнаруженным в данной работе результатом. Этот эффект представляется нами как трехмерное обобщение ориентирования плазменных каналов, ранее наблюдавшегося в двумерных лабиринтах [16, 17], в которых канал должен правильно выбрать маршрут на каждом разветвлении пути, который приведет к цели.

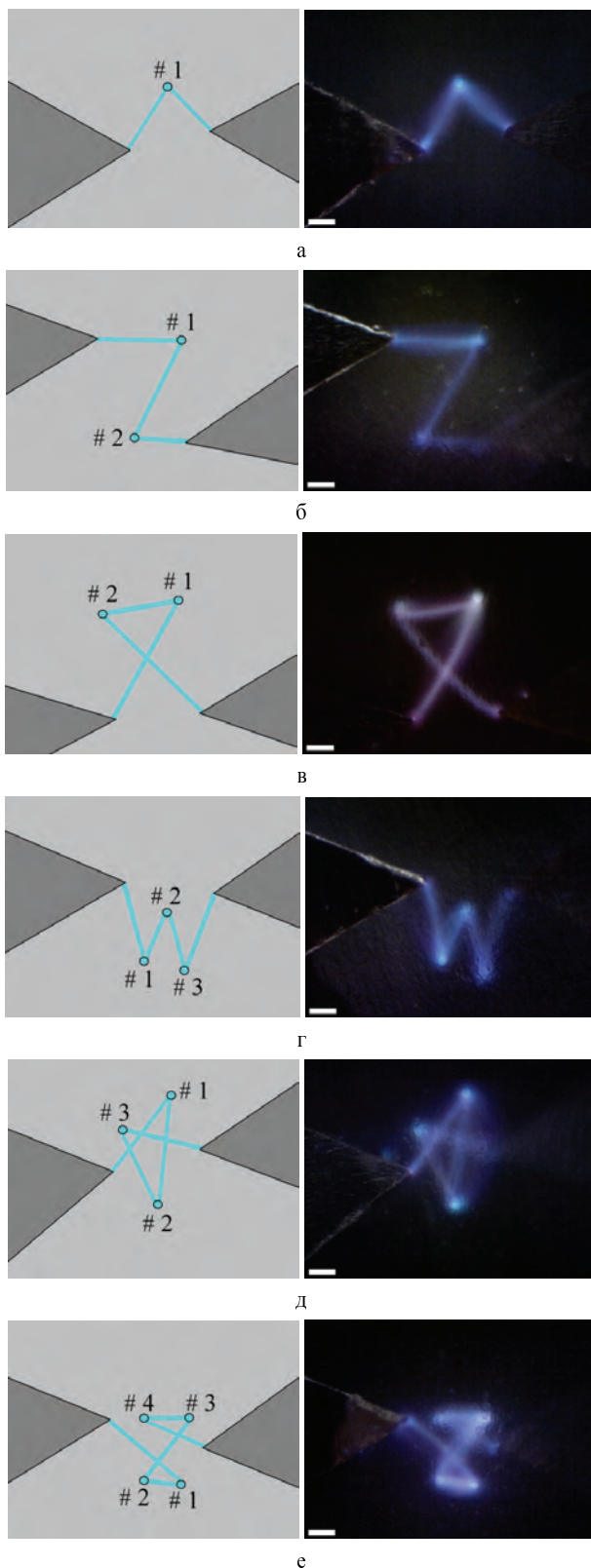


Рис. 5. Схемы различных маршрутов (слева) и соответствующие им изображения каналов (справа) однократных наносекундных поверхностных микрозарядов: а – *V*-образный канал; б – *Z*-образный канал; в – *X*-образный канал; г – *W*-образный канал; д – звездно-образный канал; е – канал сложной формы

## Выводы

В данной работе были разработаны, изготовлены и исследованы многослойные структуры, в которых генерируются наносекундные приповерхностные микроразряды при атмосферном давлении. В этих структурах слои выполнены в виде тонких прозрачных пленок, и плазменный канал разряда формируется в тонких щелях между слоями. При этом переход канала разряда из одного слоя в соседний слой осуществляется через заранее изготовленные микроотверстия. Рассмотрен процесс получения микроотверстий.

Были получены изображения микроразрядов, подтвердившие, что их плазменные каналы формируются по заданному с помощью отверстий маршруту. При этом маршрут может иметь достаточно сложную схему, иметь точки самопересечения и участки, в которых электроны обязаны двигаться против электрического поля.

При изучении формы каналов в многослойных структурах был обнаружен новый физический эффект, который заключается в азимутальной самоориентации канала разряда при прохождении его от одного микроотверстия к другому микроотверстию.

## Литература

1. Iza F., Kim G. J., Lee S. M., Lee J. K., Walsh J. L., Zhang Y. T., Kong M. G. Microplasmas: sources, particle kinetics, and biomedical applications. *Plasma Process. & Polym.* 2008. Vol. 5, № 4. P. 322–344.
2. Gianchandani Y. B., Wright S. A., Eun C. K., Wilson C. G., Mitra B. Exploring microdischarges for portable sensing applications. *Anal. Bioanal. Chem.* 2009. Vol. 395, № 3. P. 559–575.
3. Schoenbach K. H., Becker K. 20 years of microplasma research: a status report. *Eur. Phys. J. D.* 2016. Vol. 70, № 2. P. 29–1–22.
4. Ганиева Г. Р., Зиганшин Д. И., Аухадеев М. М., Тимеркаев Б. А. Электрические микроразряды в жидкостях и перспективы их применения в плазмохимии. *Инженерно-физический журнал.* 2014. Т. 87, № 1. С. 677–681.
5. Samukawa S., Hori M., Rauf Sh., Tachibana K., Bruggeman P., Kroesen G., Whitehead J. C., Murphy A. B., Gutsol A. F., Starikovskaia S., Kortshagen U., Boeuf J.-P., Sommerer T. J., Kushner M. J., Czarnetzki U., Mason N. The 2012 Plasma Roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. Vol. 45, № 25. P. 253001–1–37.
6. Wright S. A., Gianchandani Y. B. Controlling pressure in microsystem packages by on-chip microdischarges between thin-film titanium electrodes. *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2007. Vol. 25, № 5. P. 1711–1720.

7. Mitra B., Levey B., Gianchandani Y. B. Hybrid arc/glow microdischarges at atmospheric pressure and their use in portable systems for liquid and gas sensing. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2008. Vol. 36, № 4. P. 1913–1924.

8. Lee D.-S., Sakai O., Tachibana K. Mode change observed on spatial distribution of microplasma emission in a microdischarge cell with a floating electrode. *Jap. J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 48, № 10. P. 106002–1–9.

9. Lu M., Park S.-J., Cunningham B. T., Eden J. G. Microcavity plasma devices and arrays fabricated by plastic-based replica molding. *J. Microelectromechan. Syst.* 2007. Vol. 16, № 6. P. 1397–1402.

10. Hsu C.-C., Tsai J.-H., Yang Y.-J., Liao Y.-C., Lu Y.-W. A foldable microplasma-generation device on a paper substrate. *J. Microelectromechan. Syst.* 2012. Vol. 21, № 5. P. 1013–1015.

11. Yang Y.-J., Hsu C.-C. A flexible paper-based microdischarge array device for maskless patterning on nonflat surfaces. *J. Microelectromechan. Syst.* 2013. Vol. 22, № 2. P. 256–258.

12. Yang Y.-J., Hsu C.-C. A flexible paper-based microdischarge array device: a novel route to cost-effective and simple setup microplasma generation devices. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2014. Vol. 42, № 12. P. 3756–3759.

13. Shatalova V. V., Dubinov A. E. Voids of brightness in nanosecond sliding microdischarges in narrow slot. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2014. Vol. 42, № 10. P. 2644–2645.

14. Dubinov A. E., Kozhayeva J. P. Generation of nanosecond spark microdischarges along the surface of wings of flying insects. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2014. Vol. 42, № 3. P. 2049–2053.

15. Kozhayeva J. P., Lyubimtseva V. A., Zuimatch E. A., Dubinov A. E. A novel insight on the geometry of plasma channels of nanosecond micron-size discharges on the surface of living tissues of plants. *Plasma Process. & Polym.* 2015. Vol. 12, № 3. P. 293–296.

16. Dubinov A. E., Kozhayeva J. P., Lyubimtseva V. A. Simple device to study influence of nanosecond surface microdischarge plasma on biomaterials. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015. Vol. 43, № 9. P. 3224–3227.

17. Reyes D. R., Ghanem M. M., Whitesides G. M., Manz A. Glow discharge in microfluidic chips for visible analog computing. *Lab on a Chip.* 2002. Vol. 2, № 2. P. 113–116.

18. Dubinov A. E., Maksimov A. N., Mironenko M. S., Pylayev N. A., Selemir V. D. Glow discharge based device for solving mazes. *Phys. Plasmas.* 2014. Vol. 21, № 9. P. 093503–1–5.

19. Nijdam S., Takahashi E., Teunissen J., Ebert U. Streamer discharges can move perpendicularly to the electric field. *New. J. Phys.* 2014. Vol. 16, № 10. P. 103038–1–9.