**ЭВОЛЮИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ СТАЦИОНАРНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ**

Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Петряков А.В., Трушкин Н.И.

*ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Россия, г. Троицк, г.Москва, ул. Пушковых, вл.12*

*e mail:* [*trushkin@triniti.ru*](mailto:trushkin@triniti.ru)

В работе [1] было установлено, что непрерывный поверхностный барьерный разряд (НПБР) в электродной геометрии острие – плоскость может существовать в трех режимах: в диффузном при малой амплитуде напряжения, в режиме «цветка» при средних амплитудах напряжения и в стримерном при высоком напряжении. Представляет интерес исследование формирования ПБР с поверхностными лидерами. В работе [2] исследовано развитие импульсного ПБР. В этих условиях развитие разряда происходит ступенчатым образом путем последовательного чередования поверхностных стримеров и лидеров. Первичным звеном в этой цепочке является формирование поверхностных стримеров, один (или несколько) из которых трансформируется в поверхностный лидер, который формирует новые стримеры и т.д. В синусоидальном ПБР при невысокой частоте напряжения (f=5 кГц) также возможно формирование поверхностных лидеров, причем в отрицательном полупериоде это формирование происходит без участия поверхностных стримеров за счет контракции на поверхности диффузной плазмы.

В настоящей работе исследуется пространственно – временная эволюция структуры НПБР, на который накладывается высоковольтный (ВВ) импульс напряжения. В этом случае на диэлектрической поверхности уже находится отложенный электрический заряд, над этой поверхностью существует плазма и температура газа вблизи поверхности может быть повышенной. Синусоидальное напряжение частотой f = 1-3кГц подавалось на штыревой электрод с радиусом закругления r = 0.1мм. Плоским низковольтным электродом служил медный диск диаметром 110мм, на который помещался диэлектрик (стекло, толщина 1 мм, диаметр 150 мм). Электродная система размещалась в газоразрядной камере из оргстекла, в которую подавался рабочий газ (аргон) при давлении Р = 770Тор. Все эксперименты проводились с прокачкой газа, чтобы исключить накопление продуктов плазмохимических реакций. Наложение ВВ импульсов напряжения отрицательной полярности проводилось во всех трех стационарных режимах НПБР в отрицательном полупериоде синусоидального напряжения. Амплитуда ВВ импульса варьировалась от 5 до 8 кВ и заметно превышала амплитуду синусоидального напряжения (Umax ≈ 4.5кВ). Длительность переднего фронта импульса напряжения составляла 100 нс, длительность на половине амплитуды ≈3.5мкс. Пространственно – временная динамика разряда исследовалась с помощью многокадровой электронно-оптического камеры ЛВ-03. Осциллограммы тока и напряжения разряда регистрировались с помощью широкополосного цифрового осциллографа Tektronix TDS-520.

На рис. 1 представлены осциллограмма тока разряда и синхронизованные с ними фотографии, демонстрирующие раннюю стадию эволюции поверхностного разряда при наложении ВВ импульса на НПБР в диффузном режиме. В этом режиме свечение разряда на поверхности имеет форму круга диаметром 5 -6 мм, центр которого совпадает с ВВ электродом. При наложении импульса напряжения интенсивность свечения ПБР увеличивается в сотни раз. При малом времени экспозиции исходное свечение НПБР незаметно (кадр №1 на рис.1). При наложении ВВ импульса диаметр и интенсивность диффузного свечения значительно возрастают. При радиусе диффузного пятна 7 - 9 мм из ВВ электрода симметрично во все стороны происходит «вспышка» стримеров и ток разряда резко (τф = 100нс) возрастает до Iа= 2-3А.

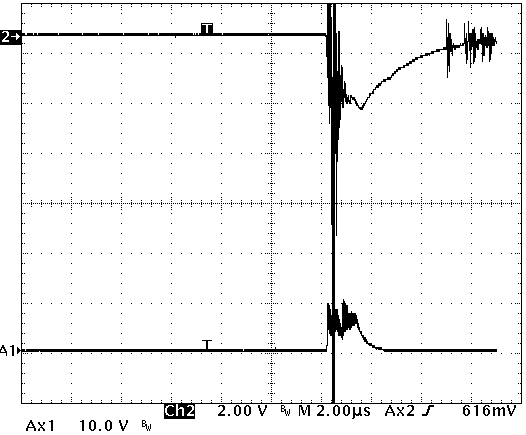
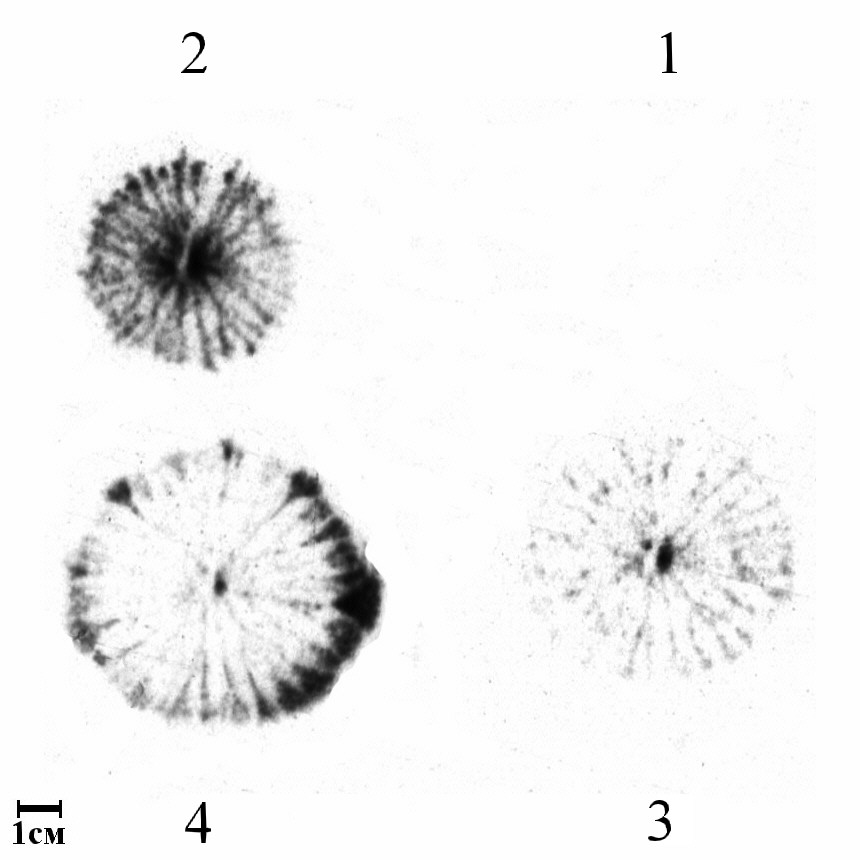


Рис.1. а) Эволюция разряда при наложении ВВ импульса на НПБР в диффузном режиме. Время экспозиции кадров τэ1,2 = 100 нс, τэ3,4 = 500 нс, время между кадрами t1-2 , t3-4 = 150нс, t2-3 = 300нс; б) A1 –метки ЛВ, Ch2 –ток, I = 330мА/дел.

После резкого всплеска ток разряда медленно уменьшается, но удлинение стримеров происходит и на стадии спада тока, при этом скорость распространения стримеров падает от 5\*106см/с до нуля. Радиус области, занятой стримерами, достигает величины R=4см. После остановки стримеров интенсивность их свечения быстро уменьшается. Однако через время t=1-1.5 мкс из первоначальных полураспавшихся стримеров формируется 6-7 ярких плазменных каналов - поверхностных лидеров. Их длина увеличивается до 5-5.5 см. Лидеры постепенно распадаются (с характерным временем τ = 10мкс). Поздняя стадия эволюции ПБР представлена на рис.2.

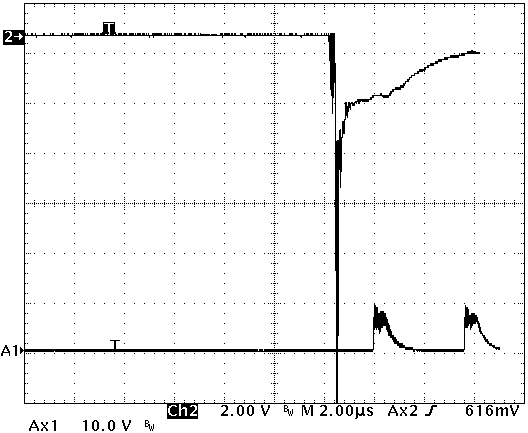
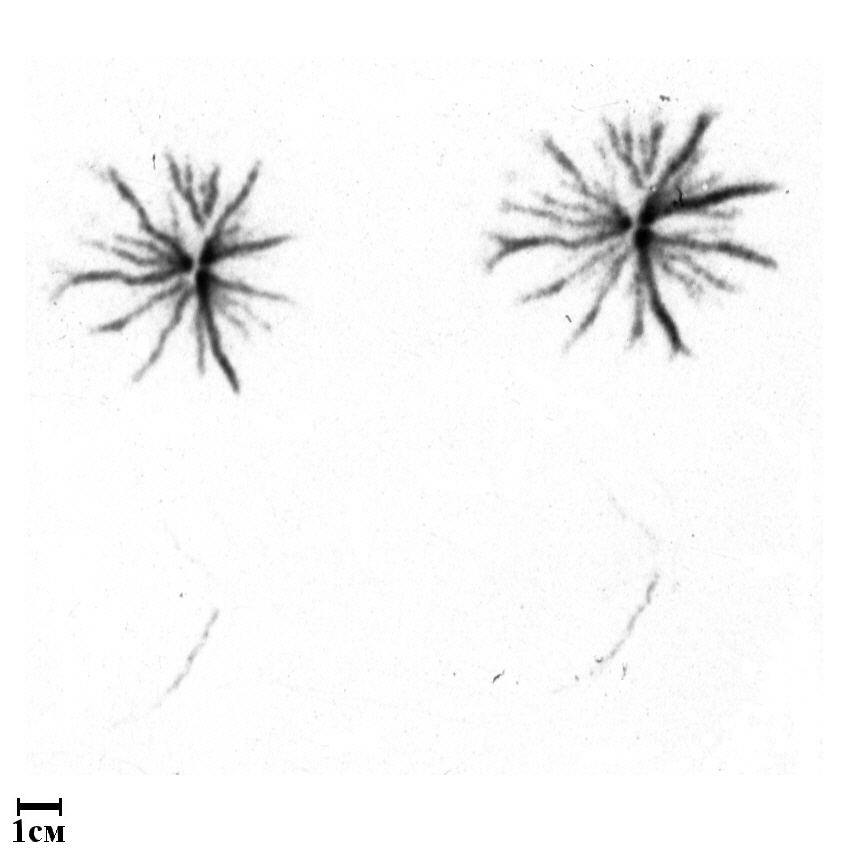


Рис.2. а) Эволюция разряда при наложении ВВ импульса на НПБР в диффузном режиме. Время экспозиции кадров τэ = 200нс, время между кадрами t1-2 , t3-4 = 200нс, t2-3 = 3мкс. б – осциллограмма тока разряда с метками ЛВ. A1 – метки лупы, Ch2 – ток, I = 330мА/дел.

В стационарном режиме «цветка» свечение ПБР имеет форму цветка и состоит из контрагированных каналов (ножки цветка) и диффузной формы (лепестки цветка). При наложении ВВ импульса происходит увеличение длины и яркости ножек и лепестков цветка. Эволюция ПБР на ранней стадии показана на рис.3. Вспышки стримеров при этом не происходит, т. е. формирование поверхностных лидеров в этом режиме происходит за счет контракции диффузной плазмы. Ток разряда при этом увеличивается до Iа=2-3А. Через t =500 нс яркое диффузное свечение исчезает, величина тока уменьшается до I = 0.5А, интенсивность свечения контрагированных каналов (поверхностных лидеров) существенно снижается.

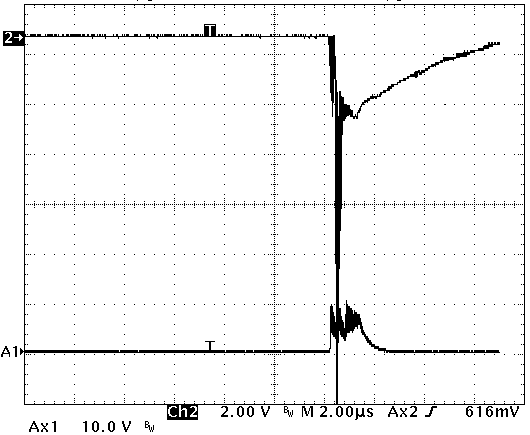
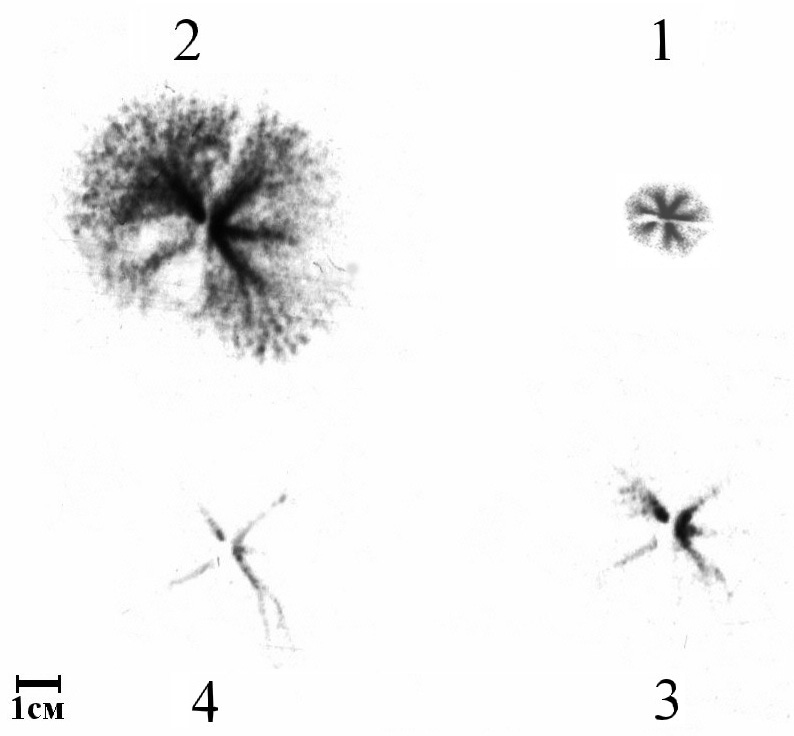


Рис.3. Эволюция разряда при наложении ВВ импульса на НПБР в режиме «цветка». Время экспозиции кадров τэ1,2 = 100нс, τэ3,4 = 500нс, время между кадрами t1-2 , t3-4 = 150нс, t2-3 = 300нс; б – осциллограмма тока разряда с метками ЛВ, соответствующая моменту наложения импульса напряжения. A1 – метки лупы, Ch2 – ток, I =1А/дел.

Эволюция ПБР на поздней стадии показана на рис.4. Через время t=2 мкс некоторые из контрагированных каналов «разгораются» вновь (рис.4). Эта стадия длится 1-2 мкс, после чего поверхностные лидеры распадаются и ток разряда возвращается к стационарному значению.

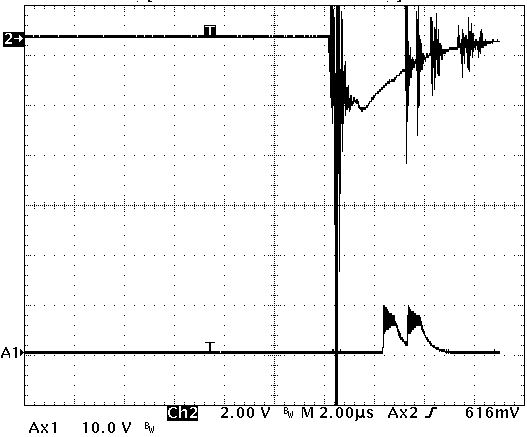
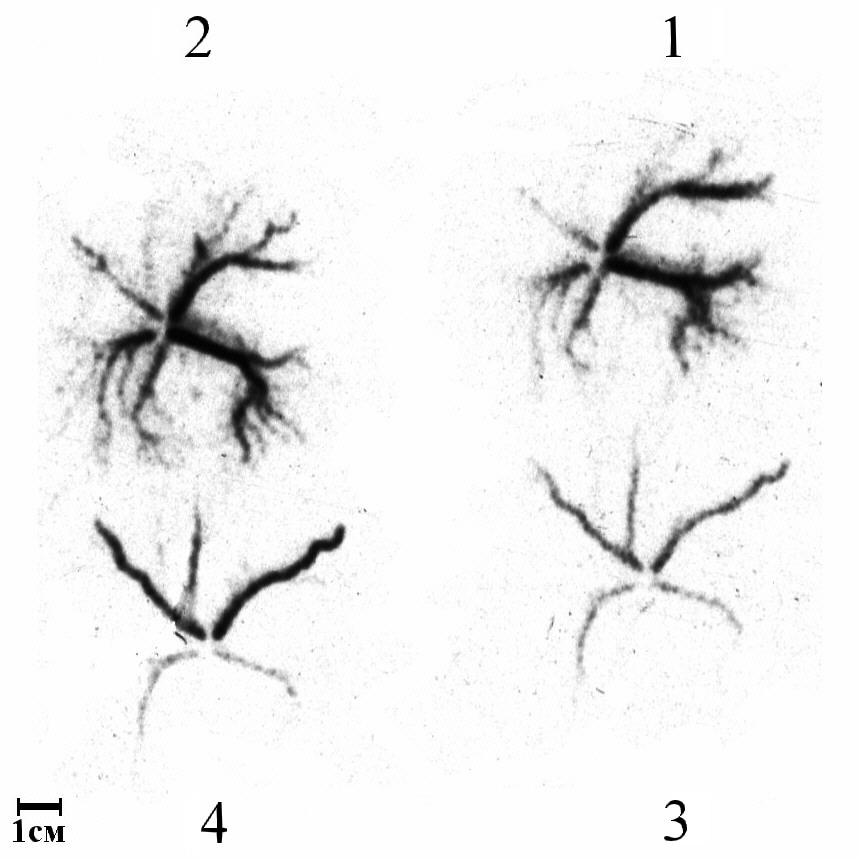


Рис.4. а) Эволюция разряда при наложении ВВ импульса на НПБР в режиме «цветка». Время экспозиции кадров τэ = 200нс, время между кадрами t1-2 , t3-4 = 200нс, t2-3 = 1мкс. б – осциллограмма тока разряда с метками ЛВ, соответствующая моменту наложения импульса напряжения. A1 – метки лупы, Ch2 – ток, I =1А/дел.

В стримерном режиме синусоидального НПБР поверхностные стримеры существуют в положительном и отрицательном полупериодах. Количество отрицательных стримеров заметно меньше, чем положительных, и стартуют они не с ВВ электрода, как в диффузном режиме, а из головы поверхностного лидера. При наложении импульса напряжения от ВВ электрода отрастает один или несколько широких (5-6мм) ярких поверхностных лидеров, которые растут быстрее, чем в стационарном режиме – их скорость достигает V≈1.5\*107см/с. Эта стадия развития разряда соответствует плавному нарастанию тока до величины I = 300 - 700 мА. После того, как длина лидера достигает 3-3.5 см, из его головы выбрасывается большое количество стримеров (рис.5). Ток при этом резко возрастает (τф=100нс) до I=1.5 ÷ 3А. Через t=500нс ток спадает до I=0.5А, при этом из стримеров формируется 2-3 контрагированных канала, из головок которых происходят слабые стримерные вспышки (рис.5, кадр №3), рождающие слабые импульсы тока. Т.о. наложение ВВ импульса напряжения на НПБР в стримерном режиме приводит к чередованию переходов лидер –стример, при этом первым шагом в этой цепи является образование лидера.

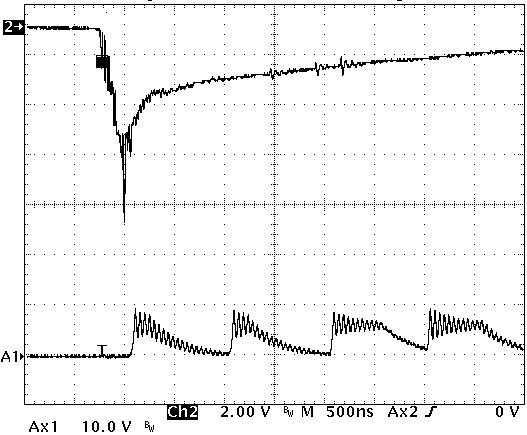
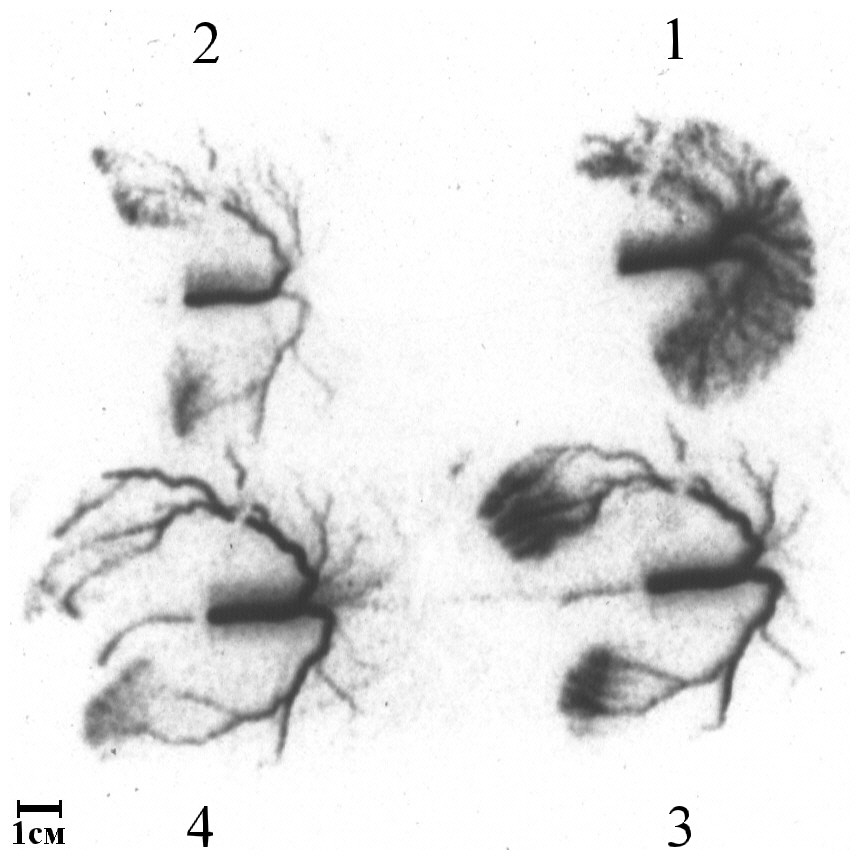


Рис.5. Эволюция разряда при наложении ВВ импульса на НПБР в стримерном режиме. Время экспозиции кадров τэ1,2 = 200нс, τэ3,4 = 500нс, время между кадрами 1мкс; б – осциллограмма тока разряда с метками ЛВ, A1 – метки лупы, Ch2 – ток, I =1А/дел.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14–02–01067).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Yu. Akishev, G. Aponin, M. Grushin, V. Karalnik, and N. Trushkin. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** (2005) 332.

2. Yu. Akishev, G. Aponin, A. Balakirev, M. Grushin, V. Karalnik, A. Petryakov and N. Trushkin. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** (2013) 135204.