

# Метод Кирлиан. Часть 8. Барьерный разряд.

Колтовой Николай Алексеевич

[koltovoi@mail.ru](mailto:koltovoi@mail.ru) , Все книги на сайте: [Koltovoi.nethouse.ru](http://Koltovoi.nethouse.ru),

Москва-Смоленск  
2017

Электронный математический и медико-биологический журнал  
«Математическая морфология»

---

УДК 537.523

Колтовой Н.А. Метод Кирлиан. История электрографических исследований. Часть 1. - Москва-Смоленск: Электронный математический и медико-биологический журнал "Математическая морфология", 2017. 69 с. - 81 Илл.

Аннотация. Приводится обзор исследований, посвященных изучению барьерного разряда.

Рецензенты: д.м.н., профессор Фаращук Н. Ф.; д.м.н., профессор Глотов В. А.

---

Koltovoi N.A. Kirlian Photography. History electrophotographic research. Part 1. - Moscow-Smolensk: Electronic mathematical and biomedical journal "Mathematical morphology" 2017. S. 69 - 81 Fig. Abstract. An overview of research devoted to the study of the barrier discharge.

---

## Глава 1. Барьерный разряд. 8-2

- 1.1 Физика барьерного разряда.
- 1.2 Экспоненциальная зависимость разряда.
- 1.3 Вольт-амперная характеристика барьерного разряда.
- 1.4 Литература по барьерному разряду.

## Глава 2. Скользящий барьерный разряд от длинного электрода. 8-16

- 2.1 Процессы происходящие при скользящем барьерном разряде.
- 2.2 Применение барьерного разряда в авиации для контроля потоков.

## Глава 3. Распространение разряда по поверхности диэлектрика, скользящий разряд. 8-39

- 3.1 Скользящий разряд от точечного электрода.
- 3.2 Распространение разряда по поверхности кожи.
- 3.3 Распространение разряда по поверхности Земли.
- 3.4 Распространение разряда по различным поверхностям.
- 3.5 Распространение разряда между двумя точечными электродами по поверхности.
- 3.6 Литература по скользящему барьерному разряду.

## Глава 4. Применение холодной плазмы газового разряда для дезинфекции. 8-55

- 4.1 Воздействие холодной плазмы на кожу.
- 4.2 Литература по применению холодной плазмы в медицине.

## Глава 5. Загибание стримеров, структура стримеров при барьерном разряде. 8-61

---

Chapter 1. The barrier discharge. 8-2

- 1.1 Physics of the barrier discharge.
- 1.2 the Exponential dependence of discharge.

1.3 Volt-ampere characteristics of the barrier discharge.

1.4 Literature on barrier discharge.

Chapter 2. Sliding barrier discharge from the long electrode. 8-16

2.1 Processes occurring at sliding barrier discharge.

2.2 Application of barrier discharge in air flow control.

Chapter 3. The spread of the discharge on the dielectric surface, the sliding discharge. 8-39

3.1 the Sliding discharge from the point electrode.

3.2 Distribution of discharge on the surface of the skin.

3.3 Distribution of discharge on the surface of the Earth.

3.4 Distribution of discharge on different surfaces.

3.5 the Distribution of discharge between two point electrodes on the surface.

3.6 the Literature on a variable barrier level.

Chapter 4. The application of cold plasma of gas discharge for disinfection. 8-55

4.1 Impact of cold plasma on the skin.

4.2 Literature on the use of cold plasma in medicine.

Chapter 5. Bending streamers, the structure of streamers in a barrier discharge. 8-61

---

## **Глава 1. Барьерный разряд.**

### **1.1 Физика барьерного разряда.**

**Барьерный разряд** (диэлектрический барьерный разряд, dielectric barrier discharge, DBD) возникает в газе под действием переменного напряжения, приложенного к проводящим электродам, с условием, что по крайней мере один электрод покрыт диэлектриком. Разряд можно проводить в кислороде или воздухе. Применяется для производства озона. Напряжение частотой более 50Гц и напряжением 2-4кВ подается на цилиндрические, коаксиальные электроды. Разрядный промежуток обычно составляет 1-3мм. Через трубку продувается кислород или воздух. Если в воздухе присутствуют пары воды, то образуются гидроксильные радикалы. Случай, когда один или оба электрода изолированы, называют диэлектрическим барьерным разрядом (Dielectric barrier discharge, DBD).

В последнее время исследования барьерного разряда проводятся по следующим направлениям:

- применение в медицине для обеззараживания поверхности, для разрушения вирусов и микробов,
- применение в аэродинамике, при создании барьерного разряда на передней кромке крыла уменьшается турбулентность течения воздуха, и уменьшается лобовое сопротивление (Dielectric-barrier-discharge (DBD) actuator, aerodynamic plasma actuator),
- создание установок для генерации озона,
- обработка полимерных поверхностей, модификация поверхности с помощью плазменного разряда, поверхность становится более гидрофобной, не смачиваемой, за счет образования микронеровностей,
- нанесение покрытий,
- очистка выхлопных газов,
- создание эксимерных ламп, источников ультрафиолетового излучения, не содержащих ртути,
- использование в ячейках плазменных панелей.

Различные типы барьерного разряда:

- импульсный барьерный разряд, разряд от отдельных импульсов,

-скользящий (поверхностный) барьерный разряд, в этом случае второй электрод расположен на поверхности диэлектрика, и разряд происходит вдоль поверхности диэлектрика?

-униполярный барьерный разряд, разряд возникающий под действием постоянного напряжения.

Установлено, что таунсендовский механизм разряда реализуется, когда произведение давления на размер промежутка  $pd$  меньше 200 торр·см, а стримерный механизм развивается при  $pd > 1000$  торр·см. Однако для барьерного разряда в промежутках миллиметрового размера при атмосферном давлении ( $pd \sim 76$  торр·см) было экспериментально зафиксировано возникновение стримеров, что противоречит устоявшимся представлениям.

-----  
1857-Первый, похожий на современный озонатор, был предложен Сименсом в 1897 году. По конструкции озонатор, предложенный Сименсом, относится к типу объёмных барьерных озонаторов.

1957-Simens. Pogg. Ann. 1857. Vol.102. p.66.

-----  
1943-Манлей с помощью осциллографического метода установил, что разряд в озонаторе в течение одного периода дважды возникает и дважды прекращается. Он впервые установил постоянство напряжения на разрядном промежутке независимо от изменения мгновенного значения напряжения.

1943-Manley T.C. The electric characteristics of the ozonator discharge // J. C. Trans. Electrochem. Soc. 1943. Vol.84. P.83-96.

1944-Manley T. Trans. Electroch. Soc. 1944. Vol.84. p.83.

-----  
1951-Название барьерный разряд (разряд, имеющий диэлектрический барьер) было предложено в 1951 году профессором МГУ Ереминым Евгением Николаевичем.

1961-Еремин Е.Н. Элементы газовой электрохимии М. МГУ, 1961. 79с.+  
-----

#### **Филиппов Юрий Васильевич, МГУ.**

1950-Филиппов Ю.В. Физико-химические исследования синтеза озона и принципы конструирования озонаторов. Диссертация кандидата химических наук. М. 1950.

1957-Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. Электрическая теория озонаторов. I. Статические вольт-амперные характеристики озонаторов. // Ж. физ. хим., 1957, т.31, №4, с.896-903.

1957-Емельянов Ю.М., Филиппов Ю.В. Электрическая теория озонаторов. II. Теория динамических характеристик озонаторов. // Ж. физ. хим., 1957, т.31, №7, с.1628-1635.

1958-Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. Электрическая теория озонаторов. III. Электрический ток в озонаторах. // Ж. физ. хим., 1958, т.32, № 12, с.2817-2823.

1959-Емельянов Ю.М., Филиппов Ю.В. Электрическая теория озонаторов. IV. Об активной мощности озонаторов. // Ж. физ. хим., 1959, т.33, № 5, с.1042-1046.

1960-Емельянов Ю.М., Филиппов Ю.В. Об эквивалентной электрической схеме озонаторов (ответ на статью В.В. Ястребова "К вопросу об эквивалентной электрической схеме озонаторов") // Ж. физ. хим., 1960, т.34, № 12, с.2841-2843.

1962-Филиппов Ю.В. Физико-химическое исследование электросинтеза озона. Диссертация доктора химических наук. М. 1962.

1987-Филиппов Ю.В., Вобликова В.А. Пантелеев В.И. Электросинтез озона Учебное пособие. М. МГУ. 1987. 237с.+  
-----

#### **2011-Алейник А.Н. Томск, ТПУ, Кафедра прикладной физики.**

Для исследования возможностей новых применений холодной плазмы разработан источник холодной плазмы «ПЛАЗТОР-1». Плазма образуется с помощью барьерного разряда. Амплитуда импульсов 15кВ, частота 5кГц. Барьером служит стекло, толщиной 2мм, марки С23. Напряженность электрического поля 75кВ/см. Форма импульсов прямоугольная. Температура плазмы измерена с помощью термопары и не превышает 50°C. Габариты 25x15x10см. Потребляемая мощность 100Вт.

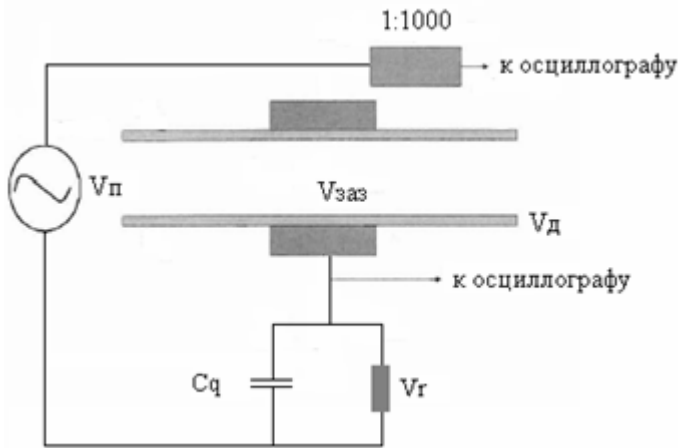


Рис. 1-1-1. Схема экспериментальной установки. Два медных электрода диаметром 4 см закрыты диэлектрическим барьером из стекла толщиной 1мм.

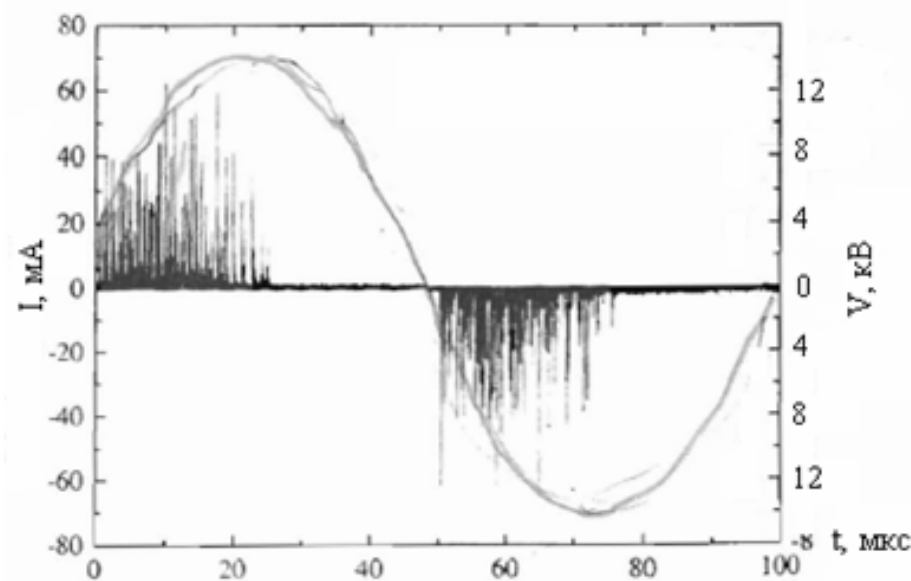


Рис. 1-1-2. Измеренные напряжение и ток.

С повышением частоты от 1 до 10кГц количество микроразрядов возрастает. При уменьшении зазора количество микроразрядов уменьшается.

Барьерный разряд характеризуется наличием одной или двух диэлектрических поверхностей внутри зазора. Можно выделить четыре фазы развития барьерного разряда:

1. Фаза Таундсена-число заряженных электронов и ионов **увеличивается экспоненциально** за счет развития лавины без искажения приложенного поля.
2. Стримерная фаза-образование проводящих каналов в газе, внутри щели.
3. Образование катодной поверхности-ток достигает максимальной величины.
4. Фаза гашения-на диэлектрических поверхностях аккумулируется электрический заряд, который уменьшает электрическое поле в зазоре ниже критического и таким образом предотвращает образование новых ион-электронных пар в газе.

Барьерный разряд может возникать в двух видах: нитевидный и тлеющий (однородный). В большинстве случаев он неоднородный и состоит из большого числа микроразрядов в зазоре. Физика образования микроразрядов основана на процессах образования и распространения стримеров с последующим разрушением плазменного канала.

Стример это волна ионизации, которая движется от анода к катоду навстречу движущейся электронной лавине. Стримеры развиваются с большой скоростью  $\sim 10^8$  см/сек и проходят зазор за несколько наносекунд. Электроны в проводящем канале рассеиваются примерно за 40нсек, в то время как тяжелые и медленно движущиеся ионы остаются в течение

нескольких микросекунд. Осаждение электронов на диэлектрическом барьере анода завершается созданием на нем отрицательного заряда, который предотвращает образование новых лавин и стримеров в месте осаждения заряда, до тех пор, пока анод и катод не поменяются местами. После смены полярности, осажденный отрицательный заряд стимулирует развитие новой лавины и стримера в этом же месте. В результате образуется много микрозарядов которые видны как яркие нити, заполняющие зазор.

Следует различать термины лавина, стример и микрозаряд. Первичный электрон, возникший в зазоре возле катода производит вторичные электроны за счет непосредственной ионизации, в результате чего развивается электронная лавина. Если лавина достигла достаточно большого размера, т.е. удовлетворяет критерию Мика, то возникает стример, который движется навстречу лавине. Стример-это очень быстрая волна ионизации, которая перекрывает зазор за несколько наносекунд и образует проводящий канал диаметром  $\sim 100$  мкм, заполненный слабоионизованной плазмой. Через этот канал начинает протекать значительный электрический ток, до тех пор, пока электрическое поле в зазоре не спадет. Спад электрического поля вызван электрическим зарядом, осажденном на электрическом барьере и зарядом ионов, находящихся в зазоре. Совокупность процессов в зарядном промежутке, инициируемых электронной лавиной и продолжающихся до тех пор, пока ток электронов не прекратится, обычно называют микрозарядом. После того, как ток прекратился, в канале разряда уже нет электронно-ионной плазмы. Однако имеется много возбужденных колебательных электронных состояний, совместно с электронным зарядом, осажденным на диэлектрической поверхности анода и зарядом ионов в зазоре. Все это называется остаток микрозаряда. Положительные ионы остатка медленно движутся к катоду, создавая спадающий ионный ток ( $\sim 10$  мкс для зазора 1мм). Остаток микрозаряда стимулирует новый микрозаряд в том же самом месте, когда полярность приложенного напряжения меняется. Таким образом, нитевидный разряд-это группа микрозарядов, возникающих в том же самом месте, когда полярность меняется. Тот факт, что остаток микрозаряда не рассеивается полностью до образования нового микрозаряда, называется эффектом памяти.

2011-Алейник А.Н. Плазменная медицина: Учебное пособие. Томск: ТПУ, 2011. 40с.+

**Стишков Ю.К.** Санкт-Петербургский государственный университет, Научно-образовательный центр "Электрофизика" физического факультета.

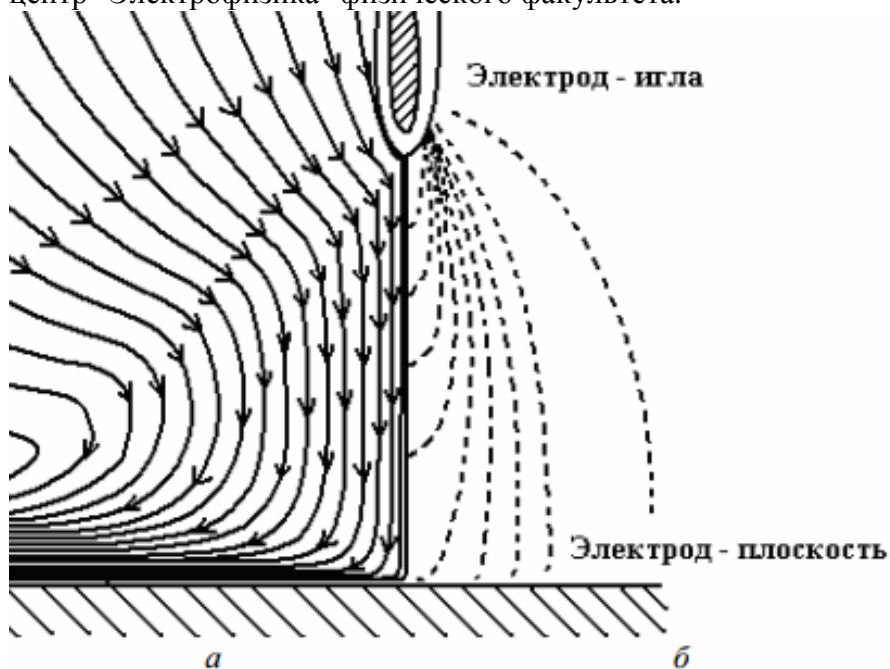


Рис. 1-1-3. Система электродов, гидродинамические потоки (а); контурный график напряженности поля (б).

2006-Афанасьев С.Б., Зарядов Ю.А., Воинов А.С., Морозов М.А., Стишков Ю.К. Влияние барьерной изоляции на характер коронного разряда в воздухе при атмосферном давлении // VIII

Международная конференция «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». СПб, 2006. с.135-138.

2008-Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Петрушенко И.Н., Стишков Ю.К. Некоторые особенности коронного разряда в воздухе // Журнал Технической Физики. 2008. Т.78. Вып.7. с.30.

2009-Стишков Ю.К., Субботский А.С., Ковалев А.Н. Регистрация и компьютерная обработка предпробойных стримеров при воздействии грозovým импульсом // IX международная конференция «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». СПб. Соло. 2009. с.210-213.

2009-Stishkov Yu., Morozov M., Samusenko A. Different forms of Dielectric-Barrier Discharge in a PointPlane Air Gap // Proceedings of International Symposium on Electrohydrodynamics. 2009. University of Sarawak, Malaysia. 2009.

2009-Козлов В.Б., Морозов М.А., Стишков Ю.К. Влияние поверхностного заряда на структуру барьерного разряда // IX Международная конференция "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей", Санкт-Петербург, 2009. с.228-232.

2010-Стишков Ю.К., Козлов В.Б., Ковалев А.Н., Самусенко А.В. Влияние барьера на форму и структуру коронного разряда в воздухе. Электронная обработка материалов, 2010, №4, с.31-40.

1994-Markus, D., Lee, T.S. Method of direct corona imaging on a dielectric transparency. (1994) Conference Record-IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2, p.1419-1424.

1994-Lee, T.S., Fung, B.K., Markus, D. Phenomenon of skipping-sparks in discharges on a dielectric surface. (1994) Conference Record, IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2, p.1414-1418.

1996-Markus, D.T., Lee, T.S. A method of direct corona imaging on a dielectric transparency. (1996) IEEE Transactions on Industry Applications, 32 (4), p.832-836.

**Дагестанский Государственный Университет, Махачкала.**

1978-Омаров О.А. и др. Физика плазмы. 1978. №3. с.491.

1979-Омаров О.А., Рухадзе А.А., Шнеерсон Г.А. О плазменном механизме пробоя газов высокого давления в сильном постоянном электрическом поле. Журнал технической физики. 1979. т.49. №9. с.1997-2000.+

1980-Омаров О.А., Рухадзе А.А. О проявлении плазменной стадии развития лавины при искровом пробое газов. Журнал технической физики. 1980. т.50. №3. с.536-539.+

**Автаева Светлана Владимировна.** Бишкек, КРСУ, Киргизско-Российский Славянский Университет. Кафедра физики и микроэлектроники.

2009-Автаева С.В. Барьерный разряд. Исследование и применение Монография. Бишкек: Изд. КРСУ, 2009. 152с.

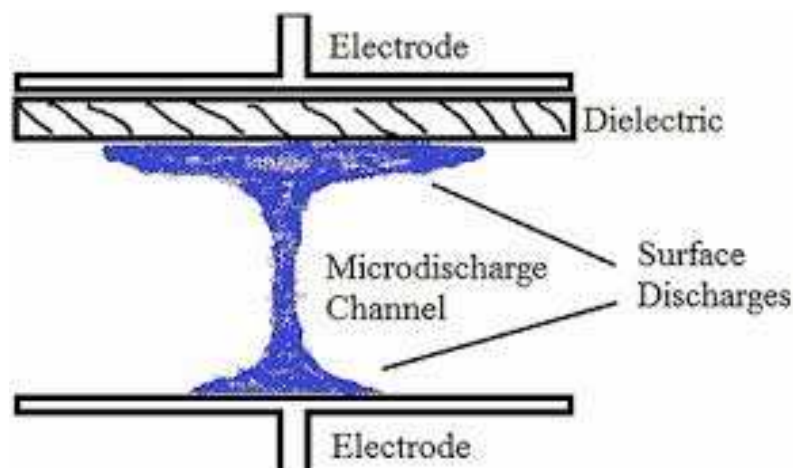


Рис. 1-1-4. Структура отдельного стримера при барьерном разряде.

2003-U. Kogelschatz, Plasma Chemistry and Plasma Processing 23, 1 (2003).

Чувашский государственный университет, Чебоксары.

**Пичугин** Юрий Петрович, к.т.н., доцент кафедры электромеханики и технологии электротехнического производства.

**Андреев** Всеволод Владимирович, к.ф.м.н., зав. каф. Телекоммуникационные системы и технологии.

Исследованная система состоит из электрода, покрытого диэлектрическим барьером, а другой электрод, имеющий плоскую или цилиндрическую форму, расположен перпендикулярно по отношению к первому. При подаче электрического напряжения на электроды в некоторой области на поверхности барьера загорается электрический разряд. Необходимо отметить, если барьер и плоский или цилиндрический электрод не соприкасаются, то возникает столб разряда в разрядном промежутке. Его проводимость очень высокая, вследствие чего данный столб разряда можно рассматривать как аналог металлического электрода, соприкасающегося с поверхностью диэлектрического барьера. В области соприкосновения с диэлектрическим барьером на его поверхности возникает расширенная область электрического разряда, называемая прибарьерным пятном. Область прибарьерного пятна обладает более низкой температурой по сравнению со столбом электрического разряда.

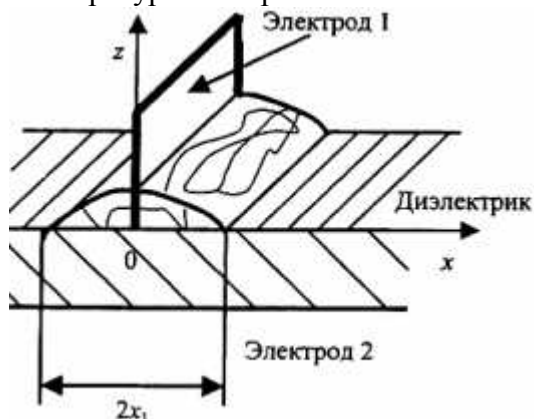


Рис. 1-1-5. Схема установки.

2000-Пичугин Ю.П. // Информационный центр "Озон", вып.№13.Материалы 20-й конференции "Генераторы озона и озонные технологии". Москва, 2000,с.43-50.

2003-Пичугин Ю.П. Актуальность и эффективность многобарьерных озонаторов. В сб.: Озон и другие экологически чистые окислители. В сб.: Наука и технологии. Материалы 25-го Всероссийского семинара. Под ред. В.В. Лунина, В.Г. Самойловича и С.Н. Ткаченко. М.: Изд-во «Университет и школа», 2003, 182, с.36-47.

2004-Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Шамсутдинов Р.Ф. Моделирование барьерного разряда // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2004. т.47. Вып.4. с.132-136.

2009-Андреев В.В., Васильева Л.А., Кравченко Г.А., Пичугин Ю.П., Филиппов В.Г. Результаты исследования структуры барьерного разряда. Нелинейный мир, 2009, т.7, № 11, с.811-819.

2011-Андреев В.В., Васильева Л.А. Исследование структуры электрического разряда вблизи электродов с различными диэлектрическими барьерами. Конф. Звенигород. 2011.+

2011-Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г.// Прикладная физика. 2011. №6. с.74.

2011-Пичугин Ю.П. Кравченко Г.А. Оценка геометрических и температурных параметров микрозарядов в барьерном разряде. Вестник Чувашского Университета. 2011. №3. с.102-107.+

2013-Андреев В.В., Пичугин Ю.П., Телегин В.Г., Телегин Г.Г. Приборы и техника эксперимента, 2013, № 3, с.58-60.

2013-Кравченко Галина Алексеевна. Исследование диэлектрических барьеров с короностойким покрытием и разработка высокоресурсных систем электродов генераторов озона. Диссертация кандидата технических наук. Чебоксары. 2013. а+.

---

1980-Сергеев Ю.Г., Соколова М.В. Распределение заряда по поверхности при разряде в газовом промежутке с диэлектриком на электроде // Электричество. 1980. №2. с.61-63.

1981-Sokolova M.V. The frequency on the discharge characteristics of on ozonizer // Proc. 15th Int. Conf Phenomena in ionized gases. Part II. 15-18 Oct. 1980. Minsk, 1981. P.543-544.

---

1966-Джуварлы Ч.М., Вечхайзер Г.В., Горин Ю.В., Леонов П.В. Вольтамперные характеристики электрического разряда в газовой полости, ограниченной диэлектриком // Изв. АН Азерб. ССР. 1966. №2. с.139-146.

1967-Джуварлы Ч.М., Вечхайзер Г.В., Леонов П.В., Горин Ю.В. Электрический разряд в газовых полостях, ограниченных диэлектриком // Изв. АН Азерб. ССР. 1967. №4. с.87-92.

1974-Джуварлы Ч.М., Вечхайзер Г.В., Леонов П.В. и др. Особенности электрического разряда в промежутке, ограниченном диэлектрическими поверхностями. // Электрофизические проблемы применения твердых и комбинированных диэлектриков в технике высоких напряжений: Сб. науч. трудов. Новосибирск: Наука, 1974. с.43-55.

1983-Джуварлы Ч.М., Вечхайзер Г.В., Леонов П.В., Рзаев Г.Р. Изменение формы разряда в промежутке, ограниченном диэлектриком, при разряде в смесях газов с электроотрицательным компонентом // Журн. технич. физики. 1983. Т.53. №5. с.830-835.

---

2010-Стишков Ю.К., Козлов В.Б., Ковалев А.Н., Самусенко А.В. Влияние барьера на форму и структуру коронного разряда в воздухе. Электронная обработка материалов, 2010, №4, с.31-40.+ Рассматривается система электродов игла-плоскость. Форма иглы-параболоид вращения с максимальным диаметром 1,6мм в основании и радиусом кривизны острия 0,1мм. Барьером служит тонкий лист плексигласа, размещенный внутри разрядного промежутка.

Введение барьера увеличивает электропрочность системы, не изменяя размера промежутка. Влияние барьера сильно зависит от расстояния от иглы до барьера (далее обозначенного как  $x$ ). Весь межэлектродный промежуток можно разделить на две характерные зоны:

- зона чехла коронного разряда, или **«ближняя зона»**, в которой идут процессы ионизации,
- зона относительно слабой напряженности поля, **«дальняя зона»**, в которой ионизация отсутствует, а ток осуществляется отрицательными ионами кислорода, возникающими в результате прилипания электронов к молекулам кислорода.

Коронный разряд обычно сопровождается электрическим ветром, зависящим от структуры чехла короны. Введение барьера в межэлектродный промежуток может существенно повлиять как на процессы в чехле коронного разряда, так и на процессы во внешней зоне. Это зависит от расположения барьера относительно игольчатого электрода.

При отрицательной полярности иглы: в случае, когда барьер располагается в зоне чехла коронного разряда (эта область составляет 0,5мм от острия иглы), значительно повышается напряжение зажигания разряда с 5 кВ (при отсутствии барьера) до 27 кВ, и разрядные токи уменьшаются более чем на порядок. Форма чехла короны существенно изменяется и приобретает специфический отраженный вид, приэлектродная область чехла коронного разряда отражается от диэлектрика под острым углом.

Для положительного коронного разряда введение барьера приводит к уменьшению разрядного тока на порядок по сравнению с исходным случаем. При расстоянии до барьера меньше 0,5мм корона горит выше острия иглы и носит мелкоочаговую облегающую форму. При расстоянии  $x$  более чем 0,5мм чехол короны смещается на кончик иглы и несколько вытянут в направлении барьера. Это объясняется тем, что с иглы на поверхности диэлектрика оседает заряд того же знака, что и поданное напряжение. Поверхностный заряд выравнивает электрическое поле вблизи кончика иглы (снижает напряженность), тем самым тормозит лавинные процессы. По этой же причине область высокой напряженности поля перемещается вверх по игле. При перемещении барьера из середины межэлектродного промежутка в область чехла напряжение зажигания короны увеличивается почти в 2,5 раза.



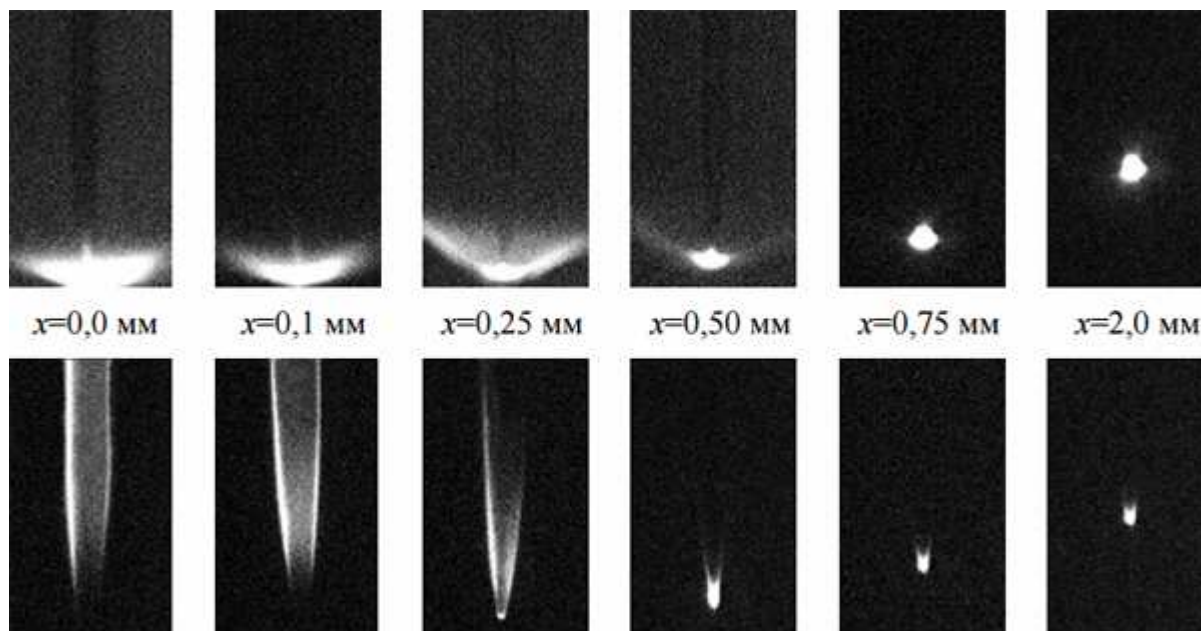


Рис. 1-1-6. Фотографии коронного разряда постоянного тока при различных расстояниях игла-барьер  $x$ ; виден электрод-игла, нижний край фотографии соответствует плоскости барьера, -верхний ряд-отрицательная полярность иглы, -нижний ряд-положительная полярность иглы.

Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Петрушенко И.Н., Стишков Ю.К. Некоторые особенности коронного разряда в воздухе. Журнал технической физики, 2008, т.78, вып.7. с.30-34.+

### Применение барьерного разряда для очистки газов.

2008-Huang X.R., Li G.F., Li J, Wu Y. Desulphurization with multi-needle-water film electrodes by corona discharge. Huan Jing Ke Xue. 2008 Sep; 29(9): p.2649-2653.

Исследуется установка по очистке воздуха от диоксида серы ( $SO_2$ ). Установка состоит из пленки воды и многоигольчатый электрод из нержавеющей стали. Под действием плазмы коронного разряда происходит удаления диоксида серы за счет образования серной кислоты. Исследована зависимость эффективности очистки от напряжения, концентрации и продолжительности воздействия коронного разряда.

### 1.2 Экспоненциальная зависимость разряда.

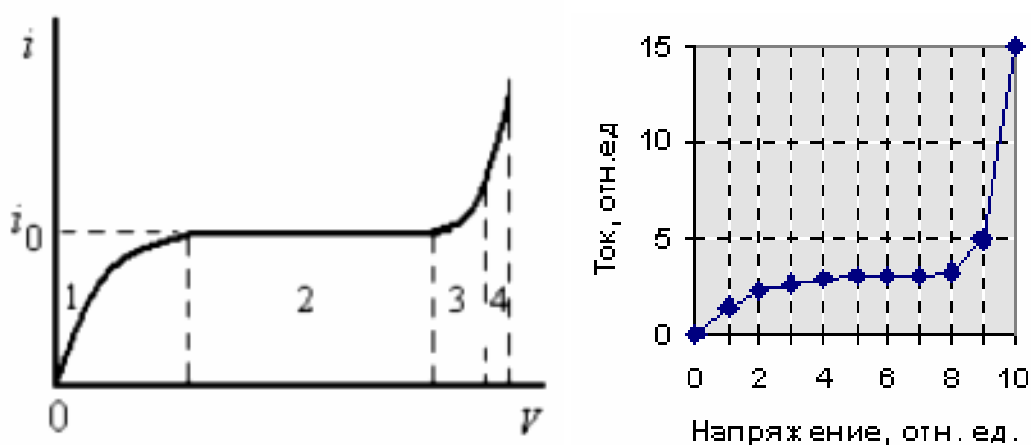


Рис. 1-2-1. Зависимость тока в газе при возрастании напряжения имеет три характерных участка. Первый-линейная зависимость, второй-насыщение, третий участок-экспоненциальный рост. В этой области резко начинают расти и диэлектрические потери. Причина заключается в появлении носителей в промежутке за счет нового механизма-ударной

ионизации. Ударная ионизация-это физическое явление увеличения числа электронов и ионов в промежутке за счет столкновения электронов с повышенной энергией с нейтральными молекулами.

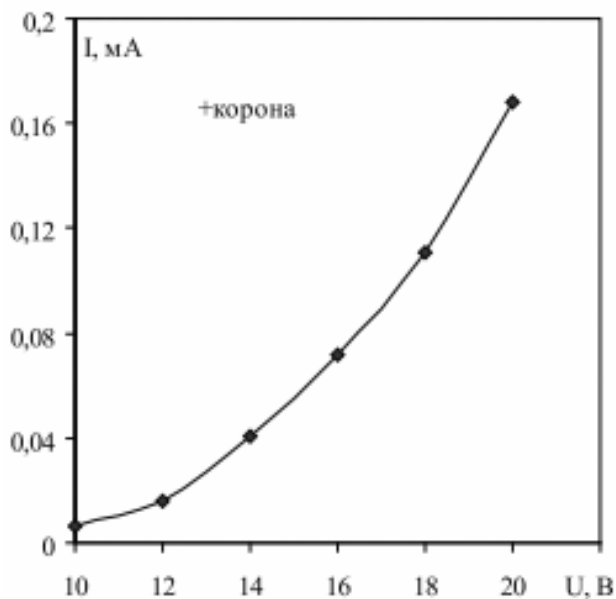


Рис. 1-2-2. Вольтамперная характеристика положительной короны.

Как только поле в зазоре превысит  $E_{br}$ , оно вызовет сильно растущий ток. Зависимость тока от поля определяется тем, что первый ионизационный коэффициент Таунсенда  $\alpha$  **экспоненциально растет с полем**. Отношение  $M$  потока электронов на аноде к потоку их на катоде в свою очередь экспоненциально зависит от  $\alpha$ . Ток через зазор увеличивается в  $M-1$  раз за время порядка  $\tau$ . Поэтому ток растет со временем примерно по экспоненциальному закону с показателем.

Незначительное увеличение средней энергии ведет к существенному возрастанию скорости ионизации плазмы в силу ее **экспоненциальной зависимости от средней энергии**.

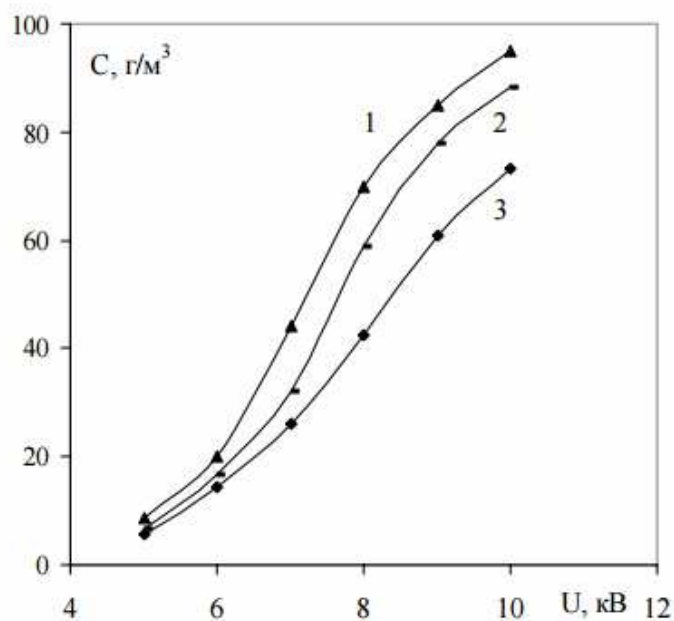


Рис. 1-2-3. В пределах от 5 до 8кВ наблюдается слабая экспоненциальная зависимость концентрации озона от подводимого напряжения.

Лелевкин В.М., Токарев А.В., Махкамбаев А.Ю. Синтез озона в комбинированном разряде с плазменным индукционным электродом.+

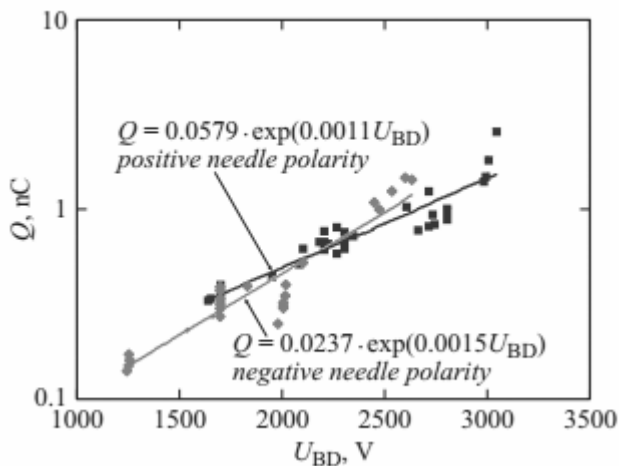


Рис. 1-2-4. Экспоненциальная зависимость интегрального значения накопленного заряда  $Q$  от величины напряжения возникновения разряда  $U_{BD}$  при разных полярностях иглы (барьер ПЭТФ  $100 \mu\text{m}$ ).

Исследованы импульсные характеристики единичных барьерных разрядов и параметры зарядов, накопленных на поверхности диэлектрика при атмосферном давлении в системе "игла-воздушный зазор 0.1-2 мм-полимерный барьер-плоскость". Экспериментально установлено преобладание напряжения возникновения разряда при положительной полярности иглы по сравнению с отрицательной полярностью на  $\square$  25-35%. Смена полярности иглы с отрицательной на положительную приводит к увеличению значения амплитуды разрядного тока и величины накопленного поверхностного заряда в  $\square$  1.5-3 раза. При положительной полярности иглы разряд обусловлен стримерным механизмом, а при отрицательной формированием одиночного импульса Тричела. Режим одиночного импульса разрядного тока наблюдается до определенного межэлектродного расстояния  $d_{CR}$ . Для положительной иглы при размере воздушного промежутка  $d_{air} > d_{CR} \approx 1.5 \text{mm}$  возникает многоимпульсная вспышечная корона ("burst corona"), а для отрицательной иглы при  $d_{air} > d_{CR} \approx 0.9 \text{mm}$  в системе наблюдается развитие затухающей серии импульсов Тричела.

2014-Бондаренко П.Н., Емельянов О.А., Шемет М.В. Исследование одиночного барьерного разряда в субмиллиметровых воздушных промежутках. Неоднородное поле. Журнал технической физики, 2014, том 84, вып. 8. с.21-29.+

### 1.3 Вольт-амперная характеристика барьерного разряда.

1987-Филиппов Ю.В., Вобликова В.А. Пантелеев В.И. Электросинтез озона Учебное пособие. М. МГУ. 1987. 237с.+

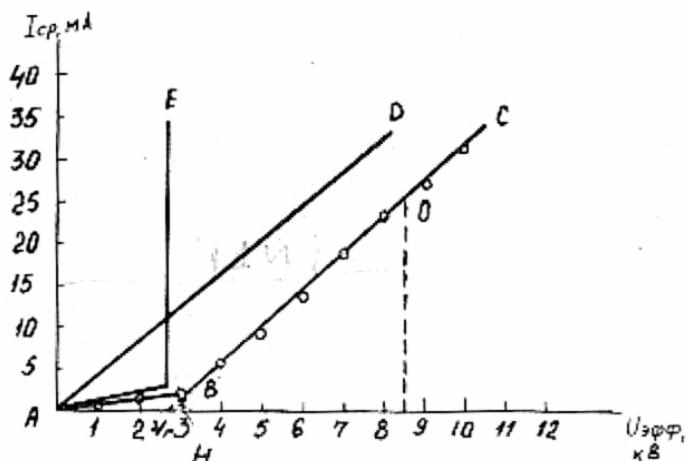


Рис. 1-3-1. Вольт-амперная характеристика барьерного разряда.

При напряжении меньше критического разряд в озонаторе отсутствует, и вольт-амперная характеристика имеет вид прямой, проходящей через начало координат. Наклон прямой определяется общей электрической емкостью озонатора.

При напряжении выше критического вольт-амперная характеристика состоит из двух отрезков. Отрезок АВ соответствует зависимости тока от напряжения при отсутствии разряда в озонаторе. Наклон отрезка определяется общей емкостью озонатора. Отрезок ВС соответствует возникновению разряда в озонаторе. Прямая АД соответствует вольт-амперной характеристике конденсатора с емкостью, равной емкости диэлектрического барьера. Отсюда следует, что падение напряжения на разрядном промежутке до возникновения разряда возрастает с увеличением тока, а после возникновения разряда остается постоянным, и не зависит от силы тока.

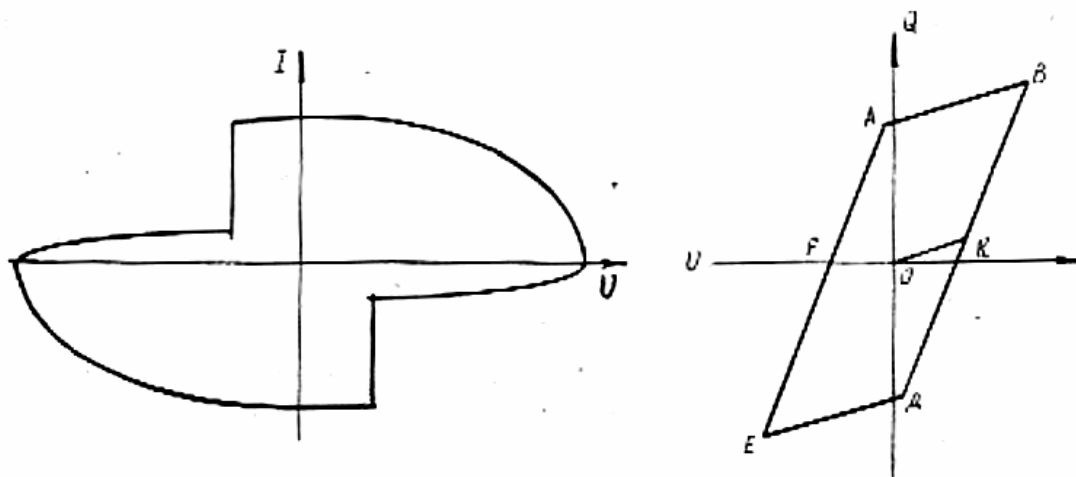


Рис. 1-3-2. Динамическая характеристика барьерного разряда, ток-напряжение и заряд-напряжение.

При увеличении напряжения на озонаторе заряд на его электродах будет расти прямо пропорционально напряжению, причем наклон прямой будет определяться общей емкостью озонатора (отрезок ОК). Когда напряжение на озонаторе станет равным критическому, возникает разряд, и увеличение заряда будет определяться емкостью диэлектрического барьера КВ. При этом напряжение на разрядном промежутке будет оставаться постоянным. Увеличение заряда будет продолжаться до тех пор, пока напряжение на озонаторе не достигнет максимального значения (точка В). В этот момент разряд в озонаторе прекращается, и заряд на электродах будет уменьшаться пропорционально напряжению (ВА), наклон определяется емкостью озонатора. В точке А напряжение станет равным критическому, возникает разряд, и заряд уменьшается пропорционально емкости диэлектрического барьера.

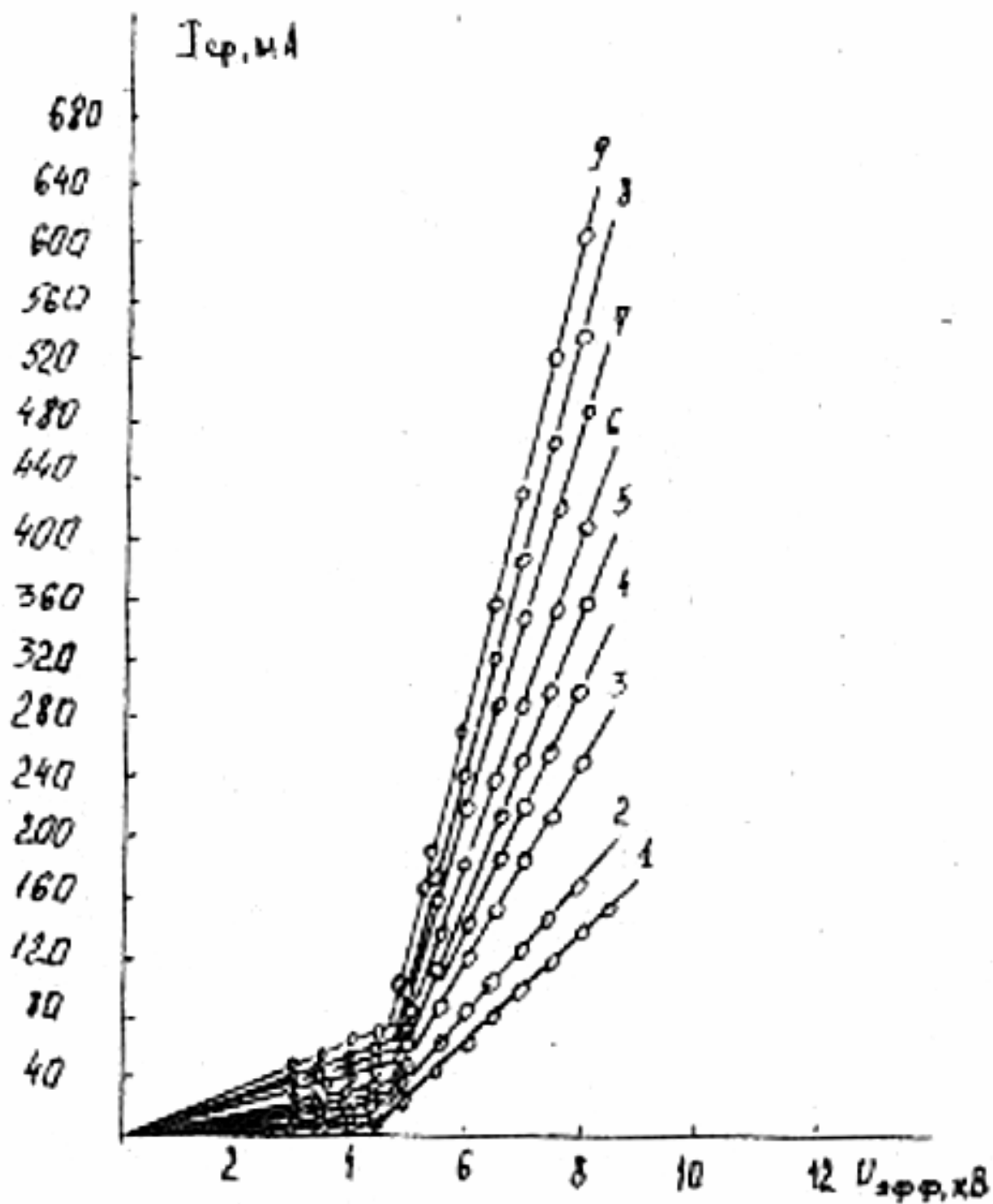


Рис. 1-3-3. Вольт-амперные характеристики барьерного разряда при разных частотах: 1-2000, 2-3000, 3-4000, 4-5000, 5-6000, 6-7000, 8-9000, 9-10000Гц.

Напряжение горения и критическое напряжение возникновения разряда не зависят от частоты.

---

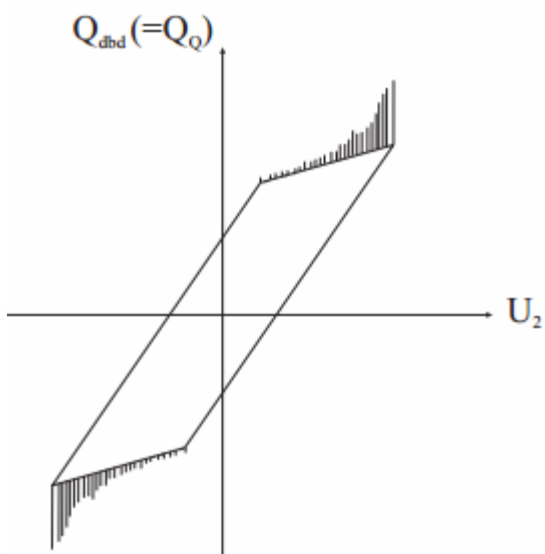
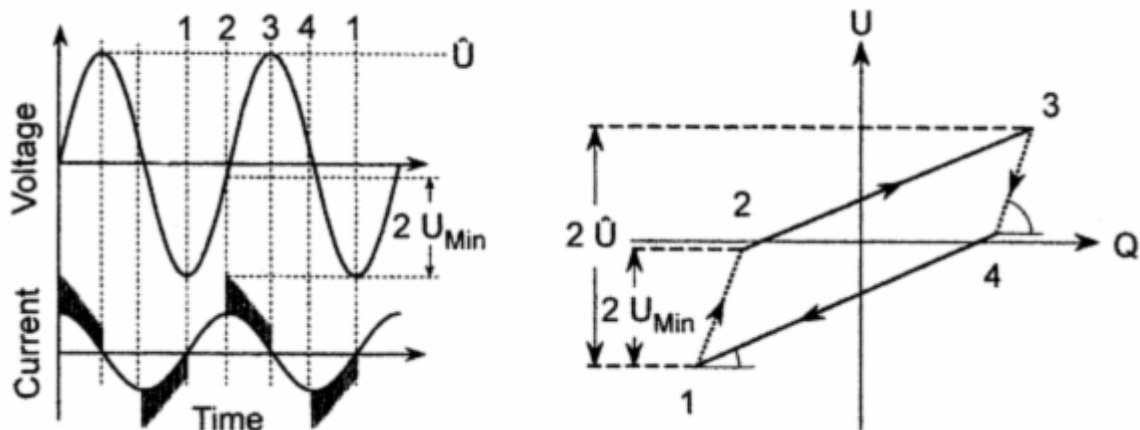


Рис. 1-3-4. Вольт/амперная характеристика.

2009-Kostov K.G.; Honda R.Y.; Alves L.M.S.; Kayama M.E. (Engineering Faculty of Guaratinguetá FEG, State University). Characteristics of dielectric barrier discharge reactor for material treatment. Braz. J. Phys. vol.39 no.2 São Paulo June 2009.+

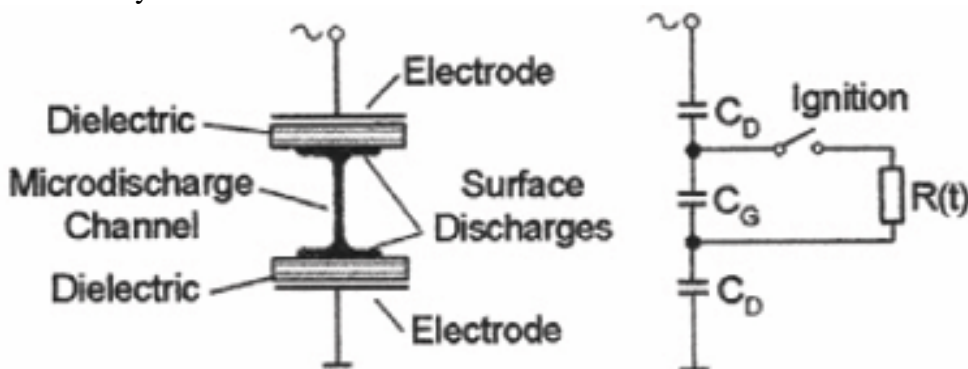


FIG. 1: Layout of DBD reactor equivalent circuit.

Рис. 1-3-5. Схема установки.

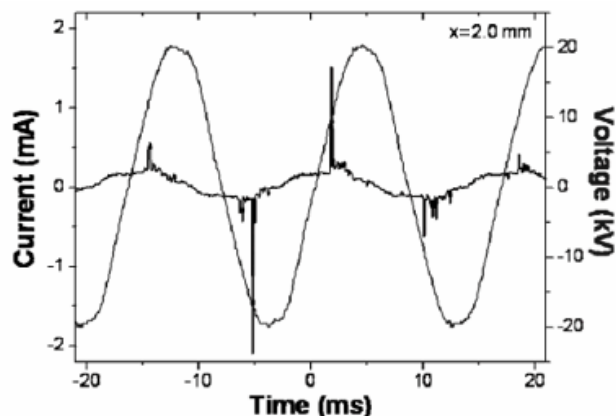


FIG. 3: Waveform of the discharge current of DBD reactor with discharge gap width of 2.0mm..

Рис. 1-3-6. Зависимость тока и напряжения от времени.

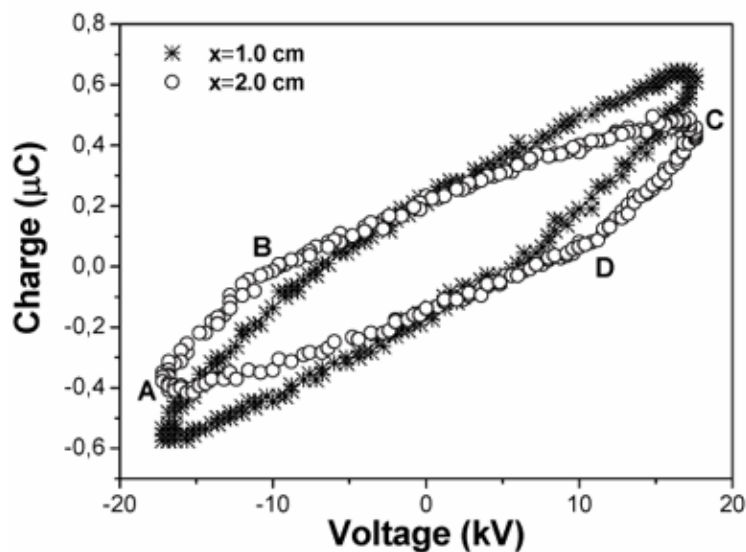


Fig.4a. Influence of the reactor gap width on the shape of Lissajous figures.

Рис. 1-3-7. Зависимость заряда от напряжения.

#### 1.4 Литература по барьерному разряду.

- Воронина В.И. Влияние параметров барьерного разряда на электросинтез озона. Диссертация кандидата химических наук. М. 1985.
- Вронски М. Кинетика синтеза озона и окислов озона в барьерном разряде. Диссертация кандидата химических наук. М. 1984.
- Дмитриев А.В., Цзян Цзе-цзянь. Изменение свойств поверхности диэлектрика под действием газового разряда // Журнал технической физики. 1966. Т.36. №4. с.739-745.
- discharge /Electrostatics, 87. Oxford, 8-10 April, 1987. с.243-248.
- Луниев В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона, М., Изд. МГУ, 1998.+
- Энгельшт В.С. Озонатор. Патент России **17544647**, 15.04.92. Бюл. №30, 15.08.92. 1992.
- Masuda S. et. al. A ceramic-based ozoniser using high frequency discharge /IEEE Trans. Ind. Appl. 1988. 24. №2. P. 223-231.
- Masuda S., Kiss E. On streamer discharges in ceramic based ozoniser using high frequency Surface-Michael A. Lindon and Earl E. Scime. CO<sub>2</sub> dissociation using the Versatile atmospheric dielectric barrier discharge experiment (VADER). Front. Phys., 26 September 2014.

## Глава 2. Скользящий барьерный разряд от длинного электрода.

### 2.1 Процессы, происходящие при скользящем барьерном разряде.

- скользящий барьерный разряд,
- поверхностный барьерный разряд,
- Single Dielectric Barrier discharge,
- скользящий разряд по поверхности диэлектрика (sliding discharge on the dielectric surface),
- барьерного разряда на поверхности диэлектрика (Surface dielectric barrier discharge, SDBD).

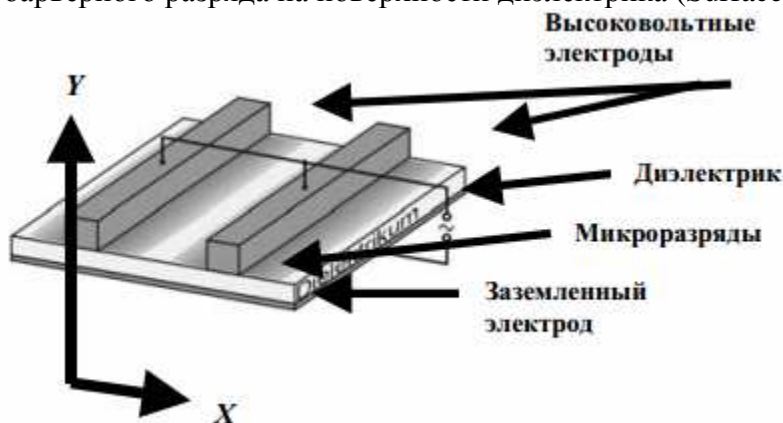


Рис. 2-1-1. Схема скользящего барьерного разряда.

Барьерно-поверхностный разряд (БПР) как новый вид разряда был предложен С.Масудой (Япония) и независимо от него В.С. Энгельштом.

При сильном токе, когда разряд растекается по поверхности объекта (а не уходит внутрь объекта), на поверхности объекта образуется след от разряда в виде разветвленной фигуры. Для образования поверхностного следа необходимо высокое напряжение, большой ток, продолжительное время воздействия. След на поверхности оставляет удар молнии (большой ток), или действие постоянного высокого напряжения. При распространения разряда по поверхности объекта ток распространяется по пути наименьшего сопротивления, поэтому образуется разветвленная структура. При протекании тока по поверхности происходит нагревание, и разрушение поверхностного слоя.

При воздействии на электроды высоковольтного импульса напряжения с амплитудой  $10^4$ - $10^5$  В и скоростью нарастания  $\sim 10^{12}$  В/с в разрядном промежутке складываются условия, характерные для наносекундного пробоя. Напряжённость электрического поля в промежутке может усиливаться до 100 раз на микронеровностях поверхности диэлектрика и электродов. При этом время развития разряда становится соизмеримым со временем протекания элементарных процессов в плазме, что приводит к отклонению от лавинного (таунсендовского) и стримерного механизмов, и даже при протекании больших токов ( $\sim 10^5$  А) разряд остаётся диффузным, канал дугового разряда не образуется.

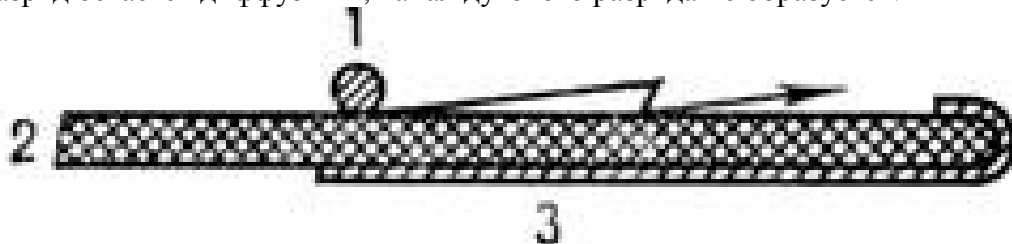


Рис. 2-1-2. Типичная конфигурация электродов, между которыми происходит скользящий разряд, 1-электрод (тонкая проволока), 2-слой диэлектрика, 3-второй электрод.



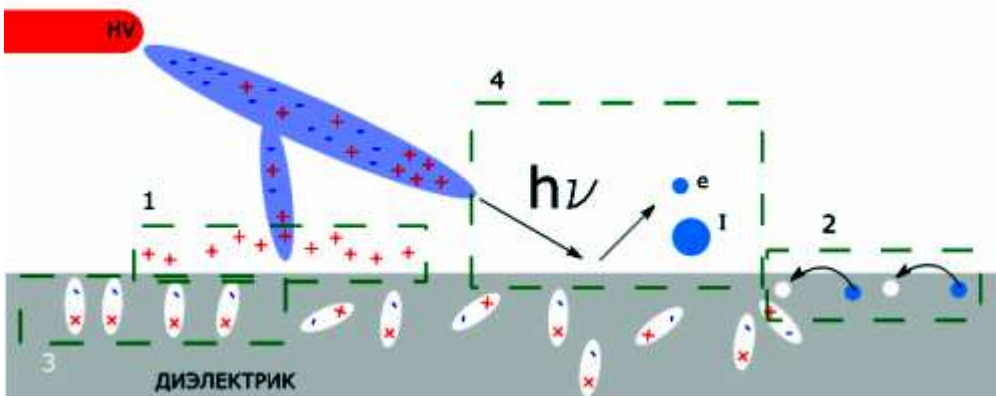


Рис. 2-1-3. Взаимодействие стримеров с поверхностью, различные механизмы: 1-через напыляемый поверхностный заряд, 2-через поверхностную проводимость, 3-через поляризацию диэлектрика, 4-через фотоэмиссию и термоэмиссию (в случае искры).

2004-C.L. Enloe, T.E. McLaughlin, R.D. VanDyken, K.D. Kachner, E.J. Jumper, T.C. Corke, M. Post, and O. Haddad, "Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: geometric effect", AIAA J., 42, 595-604 (2004).

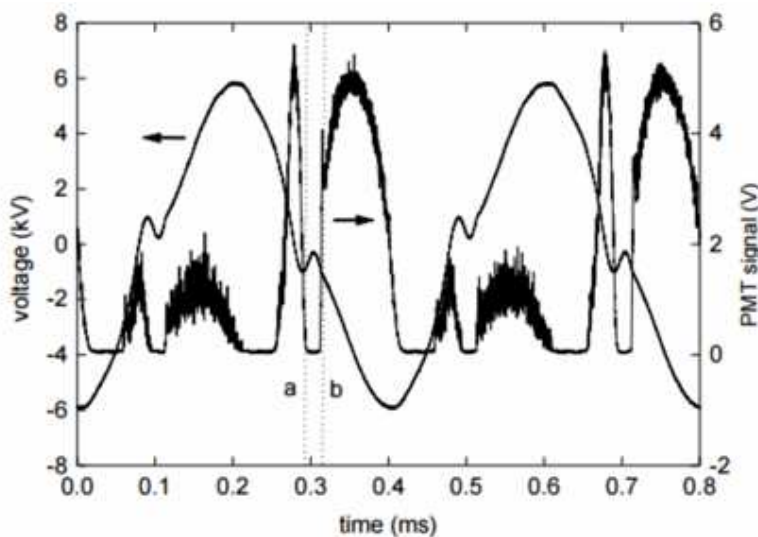
2004-C.L. Enloe, Thomas E. McLaughlin, Robert D. VanDyken, and John C. Fischer. Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: Geometric effects. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004.

2004-Enloe, et al., "Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Plasma Morphology," AIAA Journal, v. 42, n. 3, 2004, p.589-594.

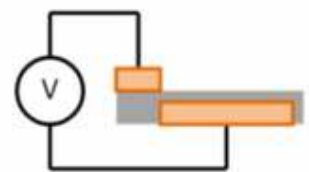
2004-C.L. Enloe, T.E. McLaughlin, R.D. VanDyken, and K.D. Kachner. Plasma structure in the aerodynamic plasma actuator. AIAA Journal, 2004.

-Thomas E. McLaughlin, C. Lon Enloe, Gabriel Font, Eric Stephen. US Air Force Academy Dielectric Barrier Discharge Plasma Investigations. What we know and what we need to know.

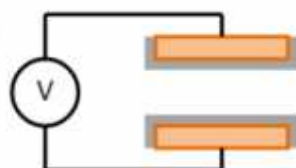
[http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/miles/atmospheric-pressure-08-1/FlowMcLaughlin\\_apwip.pdf](http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/miles/atmospheric-pressure-08-1/FlowMcLaughlin_apwip.pdf)



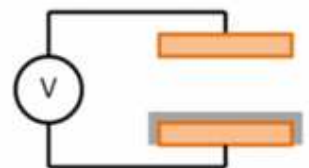
Single Dielectric Barrier (Aerodynamic Applications)



Double Dielectric Barrier (Plasma Processing Applications)



Single Dielectric Barrier (Research)



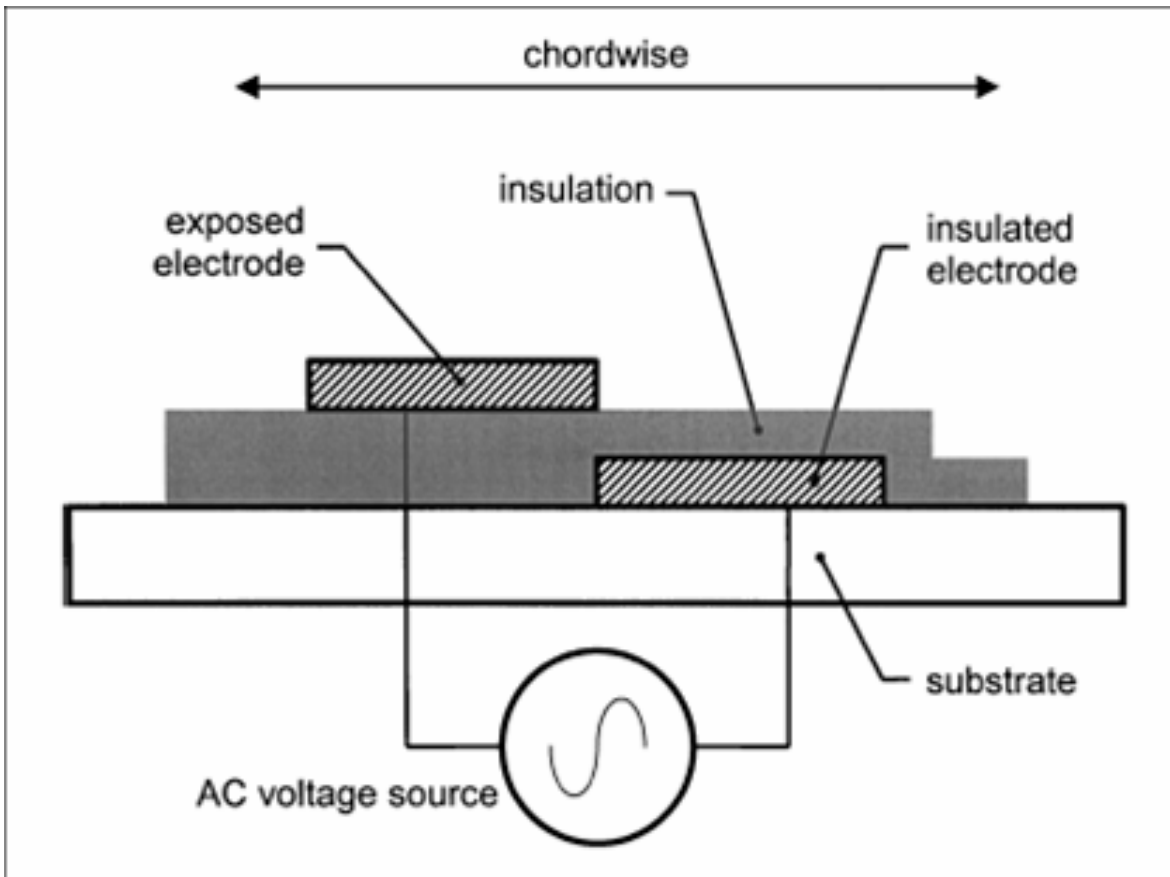


Рис. 2-1-4. Различные схемы разряда.

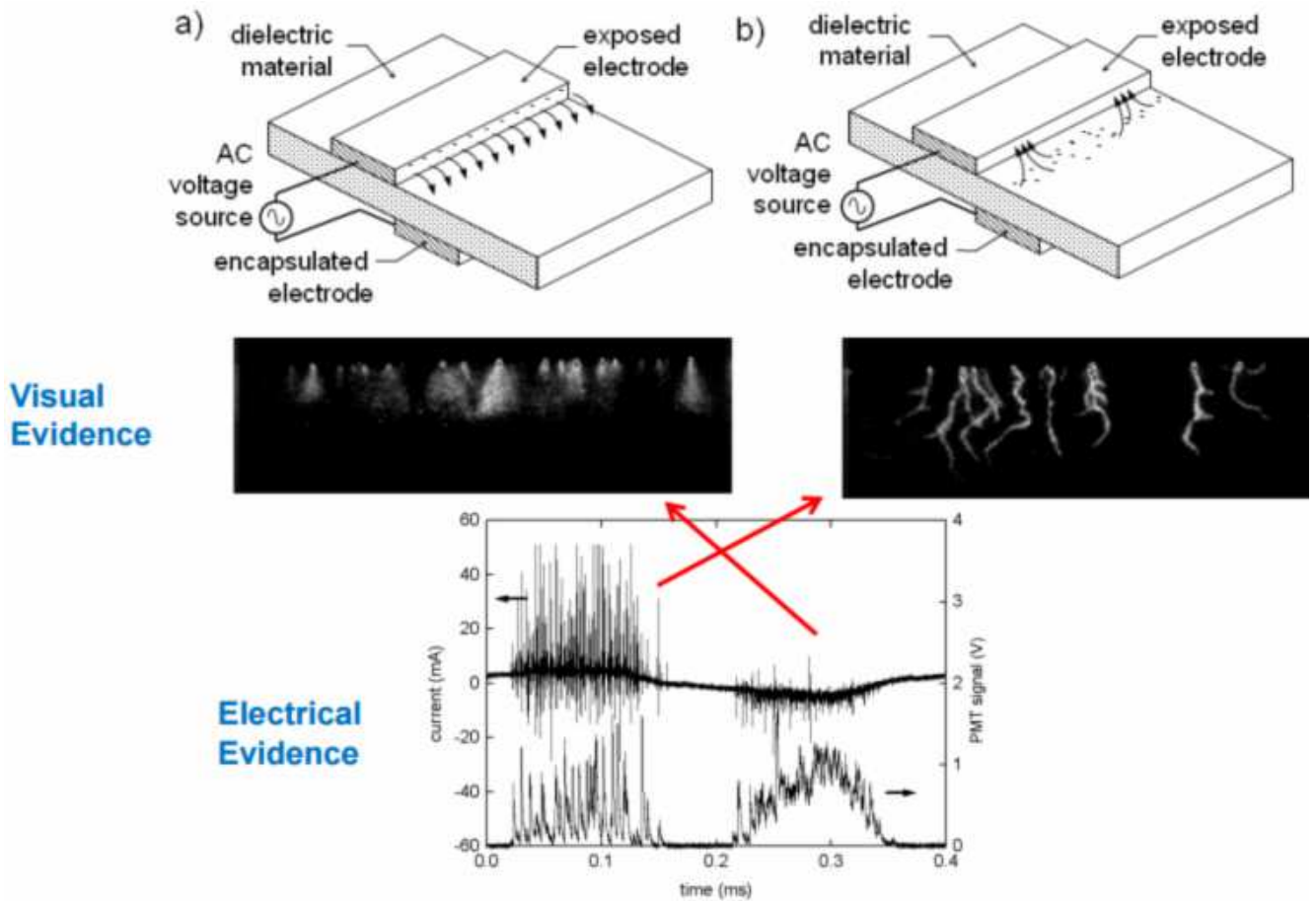


Рис. 2-1-5. Форма разряда при различной полярности напряжения.

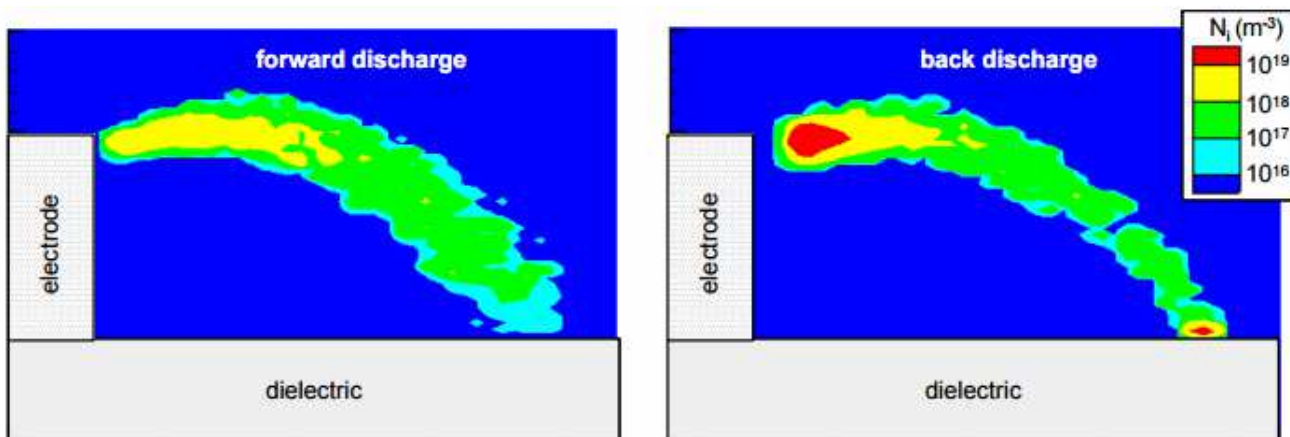


Рис. 2-1-6. Структура стримера.

**Гибалов Валентин Иванович, д.ф.м.н., МГУ, Химический факультет, Москва.**

Самойлович Вадим Георгиевич, Козлов Кирилл Вадимович.

1989-Самойлович В.Т., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М. Изд. МГУ, 1989. 176с.+

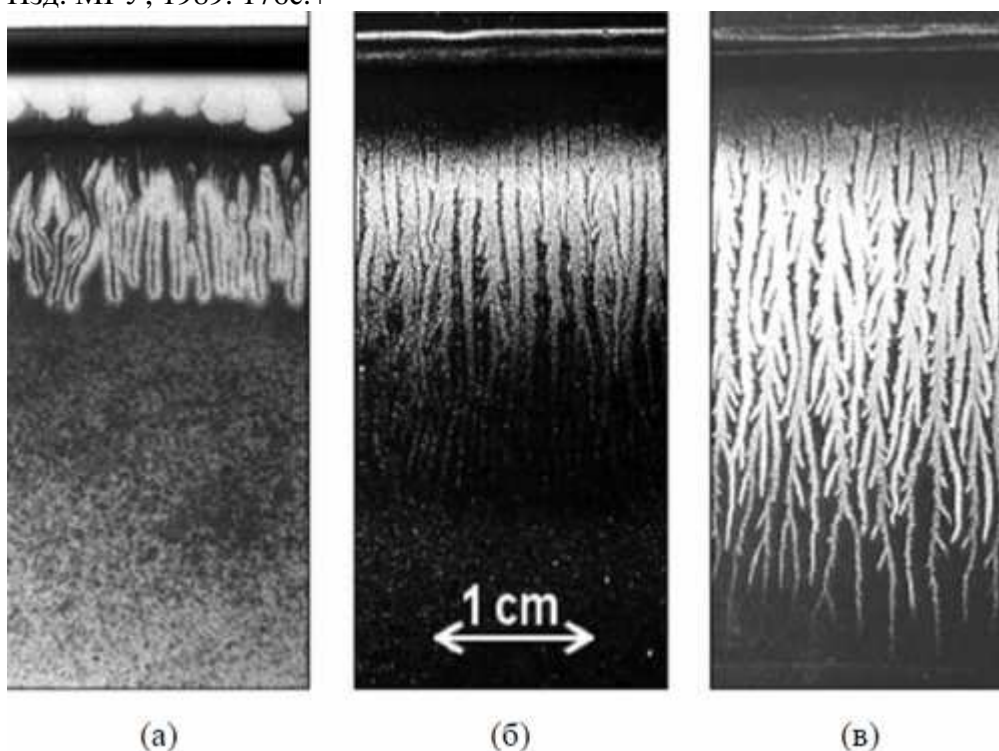


Рис. 2-1-7. Электрографическая картина поверхностного разряда на диэлектриках с различной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .

а- $Al_2O_3$  ( $\epsilon=9.8$ ),

б-боросиликатное стекло ( $\epsilon=4.8$ ),

в-сополимер полиэтилентерефталата ( $\epsilon=2.4$ ).

Чем меньше диэлектрическая проницаемость диэлектрика, тем больше размер разряда при тех же условиях.

1994-Гибалов В.И. Пич Г. Выделение энергии в канале микроразряда. Журнал физической химии, 1994. т.68. №6. с.1130-1135.

1994-Гибалов В.И. О физической природе барьерного разряда. Журнал физической химии, 1994. т.68. №5. с.926-930.

1994-Гибалов В.И. Пич Г. Численное моделирование формирования и развития канала микроразряда. Журнал физической химии, 1994. Т.68. №5. с.931-938.

1998-Saveliev A.B., Gibalov V.I., Pietsch G.J. //Proc. 14 ISPC. Prague, 1998. p.2343.

- 1999-Савельев Анатолий Борисович. Синтез озона в поверхностном барьерном разряде. Диссертация кандидата химических наук. Москва. МГУ. 1999.
- 2000-Valentin I Gibalov, and Gerhard J Pietsch. The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces. Journal of Physics D: Applied Physics. 2000. Volume 33. Number 20. p.2618-2636.
- 2005-Gibalov V.I., Pietsch G.J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. 37. p.2093.
- 2007-Ткаченко И.С., Гибалов В.И., Лунин В.В. Пробой газового промежутка в поверхностном барьерном разряде // Вестн. Моск. Ун-та. Сер 2. Химия. 2007. Т.48. № 3. с.147-151.
- 2008-Гибалов В.И., Ткаченко И.С., Лунин В.В. Пробой и формирование канала микроразряда в поверхностном барьерном разряде// Журн. физ. химии. 2008. Т.82. №6. с.1156-1160.
- 2010-Ткаченко Илья Сергеевич. (МГУ, химический факультет) Моделирование синтеза озона в поверхностном барьерном разряде в кислороде. Диссертация кандидата физико-математических наук. Москва. 2010.
- 2012-Valentin I. Gibalov and Gerhard J. Pietsch. Dynamics of dielectric barrier discharges in different arrangements. Plasma Sources Science and Technology. Volume 21. Number 2.

---

**1964-Дашук Павел Никанорович, Ленинградский Политехнический Институт.**

- 1964-Дашук П.Н. Исследование и разработка основных элементов емкостных генераторов больших импульсных токов. **Кандидатская диссертация.** Ленинград. Институт электромеханики, 1964.
- 1975-Дашук П.Н. Челноков Л.Л. Ярышева М.Д. Электрофизические характеристики стримерной стадии скользящего разряда. Электронная техника. 1975. Вып.6 с.9.
- 1975-Дашук П.Н., Челноков Л.Л., Ярышева М.Д., Характеристики скользящего разряда по поверхности твердых диэлектриков применительно к высоковольтным коммутаторам. «Электронная техника», сер. 4. «Электровакuumные и газоразрядные приборы», 1975, №6, с.9-15. В работе исследовался спектр излучения скользящего разряда.
- 1975-Дашук П.Н. Сергеенкова Е.П. Спектроскопические исследования характеристик скользящего разряда в стримерной и искровой стадиях. Всес. Семинар по физике газовых лазеров. Новосибирск. 1975. с.154.
- 1978-Дашук П.Н. Зинченко В.К. Меркулова Т.Г. и др. Журнал технической физики. 1978. 8. с.1675.
- 1979-Дашук П.Н. Чистов Е.К. Некоторые особенности распределения электрического поля в системах формирования скользящего разряда. Журнал технической физики. 1979. т.49. №6. с.1241-1244.+
- 1981-Дашук П.Н. Кулаков С.Л. Рентгеновское излучение наносекундного скользящего разряда. Письма в Журнал Технической Физики. 1981. т.7. №2. с.69-72.
- 1981-Дашук П.Н. Кулаков С.Л. Рентгеновское излучение многоканального скользящего разряда. Письма в ЖТФ. 1981. т.7. №14. с.853-857.+
- 1981-Дашук П.Н. Кулаков С.Л. Формирование электронного пучка в плазме скользящего разряда. Письма в ЖТФ. 1981. т.7. №21. с.1315-1320.+
- 1983-Дашук П.Н., Кулаков С.Л. Влияние ускоренных электронов на формирование наносекундного скользящего разряда. 6-я Всесоюзная конф. по физике низкотемпературной плазмы. Ленинград, 1983, т.2, с.390
- 1983-Дашук П.Н., Дементьев В.А., Ярышева М.Д. Электрооптические исследования развития скользящего разряда и формирования обратного лидера. Письма в Журнал Технической Физики. 1983. т.9, вып.2. с.89-94.+
- 1984-Дашук П.Н. Скользящий разряд по поверхности диэлектриков и его применение при создании электрофизических устройств. 2-е Всесоюзное совещание по физике электрического пробоя газов, ч. I, с.58, Тарту, 1984.
- 1985-Дашук П.Н. Кулаков С.Л. Рыбак Ю.В. Ионизация газа мягким рентгеновским излучением наносекундного скользящего разряда. Письма в ЖТФ. 1985. т.11. №7. с.438-442.+
- 1986-Дашук П.Н. **Докторская диссертация** посвященной исследованию физики развития скользящего разряда и его многочисленным приложениям при разработке различных

электрофизических устройств: газовых разрядов, коммутаторов, устройств микроэлектроники. 1986.

1993-Дашук П.Н. Характеристики незавершенного скользящего разряда в воздухе при  $P=105\text{Па}$ . Письма в Журнал Технической Физики. т.19. вып.18. с.21-26.+

1998-Дашук П.Н. Кулаков С.Л. Чистов Е.К. Восстановление спектра рентгеновского излучения скользящего разряда наносекундного диапазона. Письма в Журнал Технической Физики. 1998. т.24. №7. с.39-44.+ При регистрации спектра мягкого рентгеновского излучения от наносекундного скользящего разряда максимум интенсивности приходится на длину волны 1нм.

1999-Дашук П.Н. Скользящий разряд в устройствах газоразрядной визуализации. «Наука, Информация, Сознание». Санкт-Петербург. 1999. с.70.

Профессор Санкт-Петербургского Политехнического Университета д.т.н. П.Н.Дашук провел ряд экспериментов с фотографированием разрядных токов, типа скользящих разрядов конденсаторных батарей в воздухе. Фотографии в 3-5 кратном увеличении приводятся на рисунках. Причем, на рисунке изображены автографы отрицательного скользящего разряда по фотопленке. Изолирующий диэлектрик-полиэтилен толщиной  $d=0,12\text{мм}$ . Трехкратное увеличение. Максимальный разрядный потенциал  $V=-15\text{кВ}$ . Скорость подъема напряжения  $V=1012\text{В/с}$ ,  $T_f = 15\text{нс}$  ( $15 \cdot 10^{-9}\text{с}$ ).

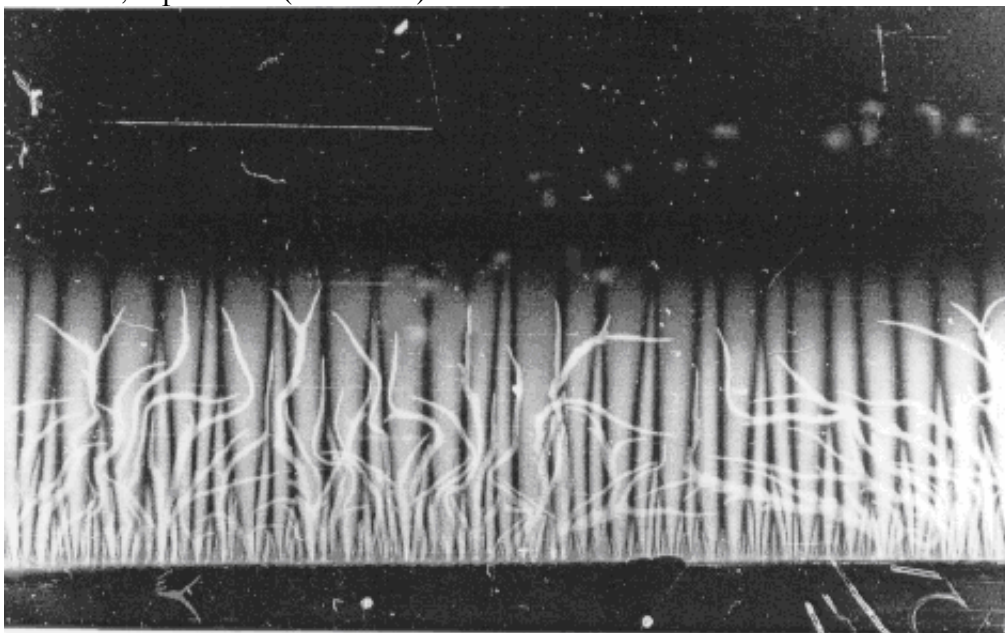


Рис. 2-1-8. Автографы скользящего разряда (-) по фотопленке (трехкратное увеличение).

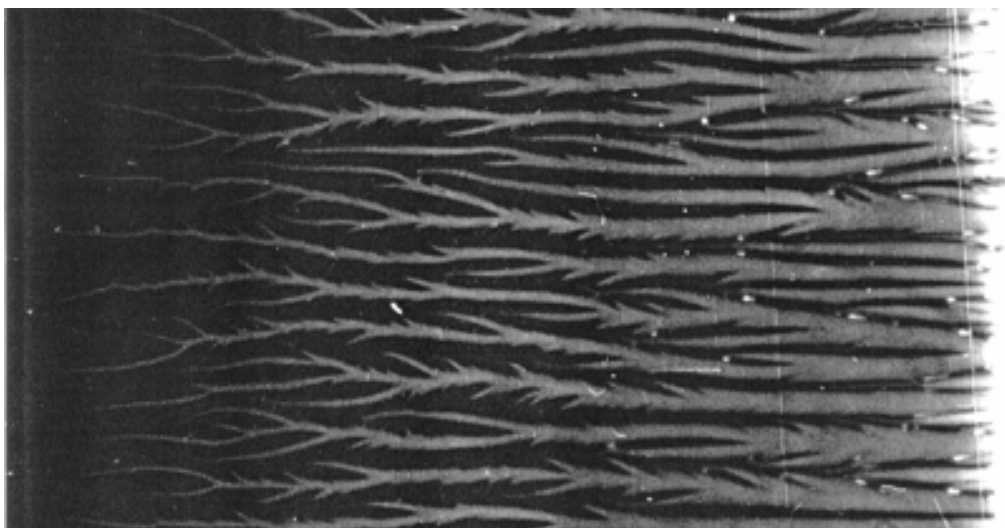


Рис. 2-1-9. Автографы скользящего разряда (+) по фотопленке (пятикратное увеличение).

На рисунке изображены автографы положительного скользящего разряда по фотопленке. Изолирующий диэлектрик-полиэтилен толщиной  $d=0,5\text{мм}$ . Пятикратное увеличение. Максимальный разрядный потенциал  $V=+15\text{кВ}$ . Скорость подъема напряжения  $V=1012\text{ В/с}$ ;  $T_f= \text{нс}$  ( $15 \times 10^{-9}\text{ с}$ ).

Стариковский А.Ю., МФТИ, Москва.

2009-Starikovskii A.Yu. (МФТИ), Nikipelov A.A., Nudnova M.M., Roupasov D.V. SDBD plasma actuator with nanosecond pulse-periodic discharge. Plasma Sources Sci. Technol. 18 (2009) 034015 (17pp).+

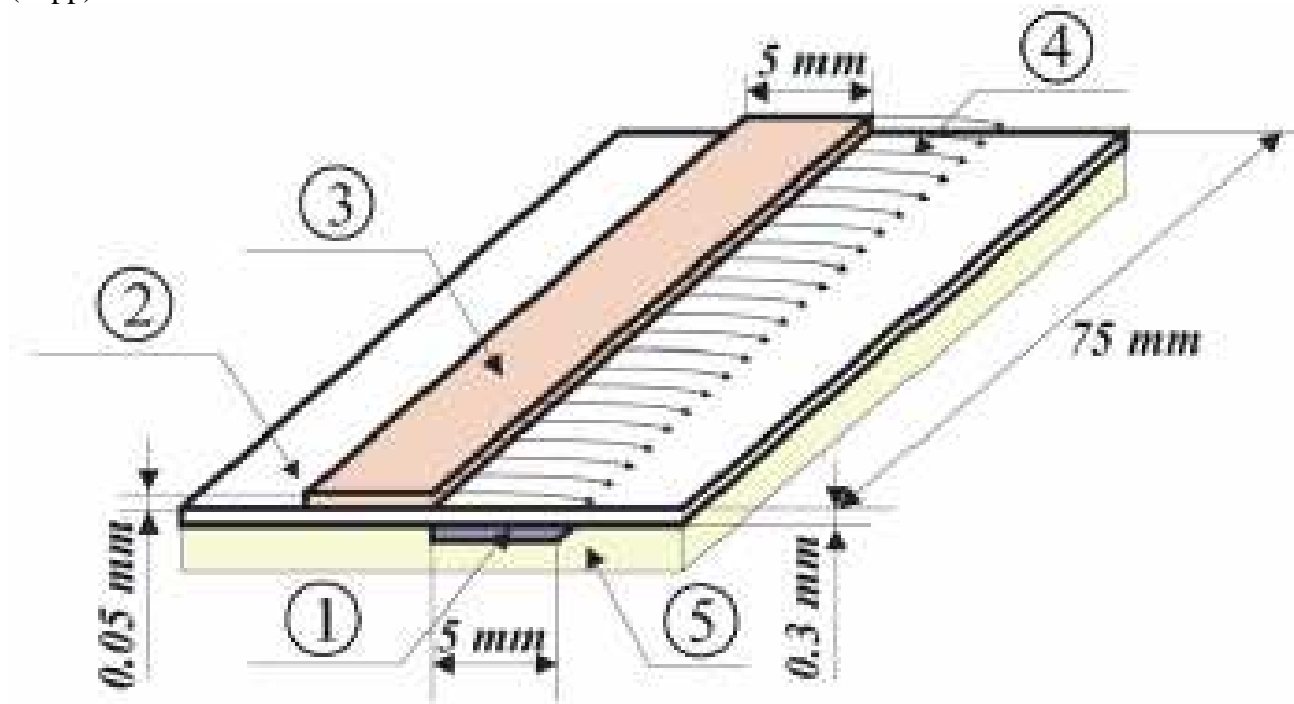


Рис. 2-1-10. Схема эксперимента.

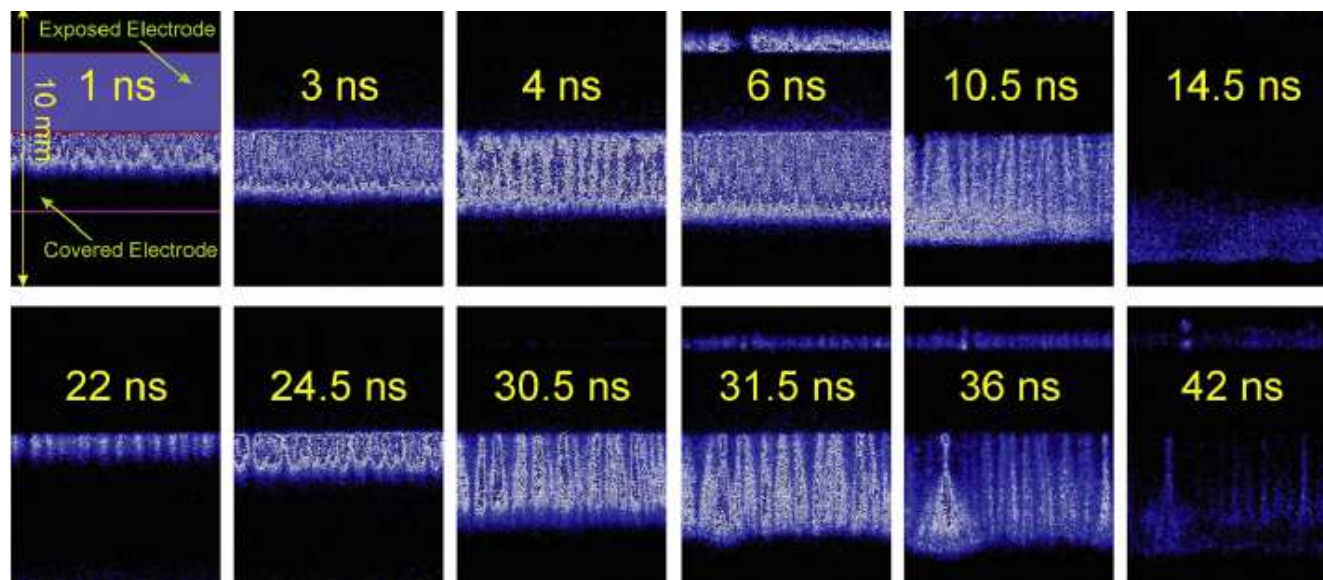


Рис. 2-1-11. Динамика распространения стримеров от наносекундного импульса напряжением 14кВ.

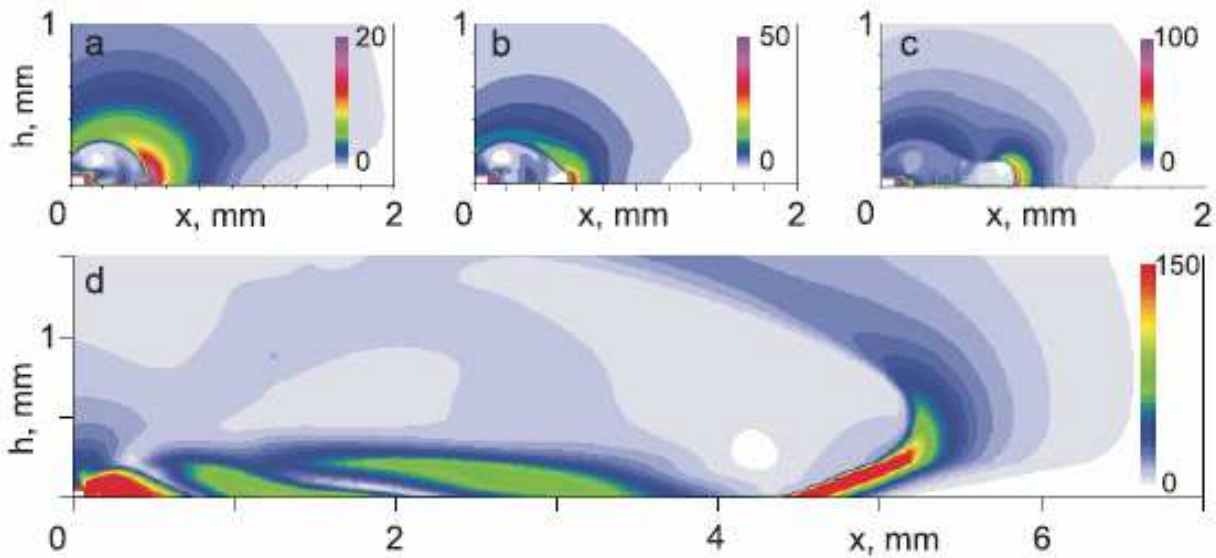


Рис. 2-1-12. Моделирование распространения стримеров.

2003-Конф. Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество. Эльбрус. 2003.

2003-Панчешный С.В., Стариковский А.Ю. (МФТИ, Долгопрудный) Численное моделирование развития стримерного разряда при высоких напряжениях.

2003-Аникин Н.Б., Стариковская С.М., Стариковский А.Ю. (МФТИ, Долгопрудный) Медленное окисление гексана в плазме наносекундного импульсного разряда.

2003-Анохин Е.М., Панчешный С.В., Стариковский А.Ю. (МФТИ, Долгопрудный) Излучение неравновесной плазмы атмосферы Земли и Марса в видимом и ВУФ диапазонах спектра.

2003-Рупасов Д.В., Стариковский А.Ю. (МФТИ, Долгопрудный) Измерение поступательной температуры ультрахолодного гиперзвукового плазменного потока по разрешенной вращательной структуре первой отрицательной системы иона азота.

2003-Рупасов Д.В., Стариковский А.Ю., Хорунженко В.И. (МФТИ, Долгопрудный) Динамика энергообменов в гиперзвуковом плазменном потоке.

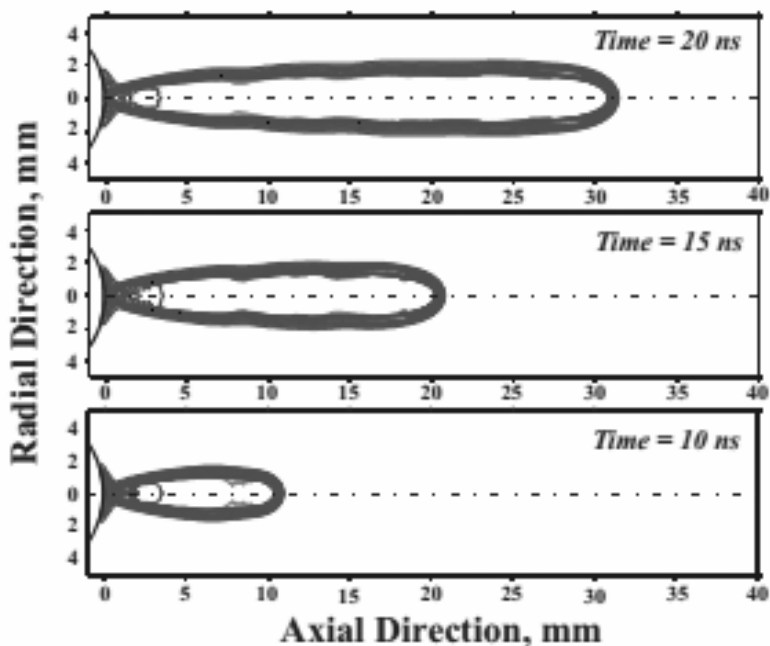


Рис. 2-1-13. Моделирование развития стримерного разряда в большом промежутке (130мм) в смеси газов N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> при атмосферном давлении, напряжение 100кВ.

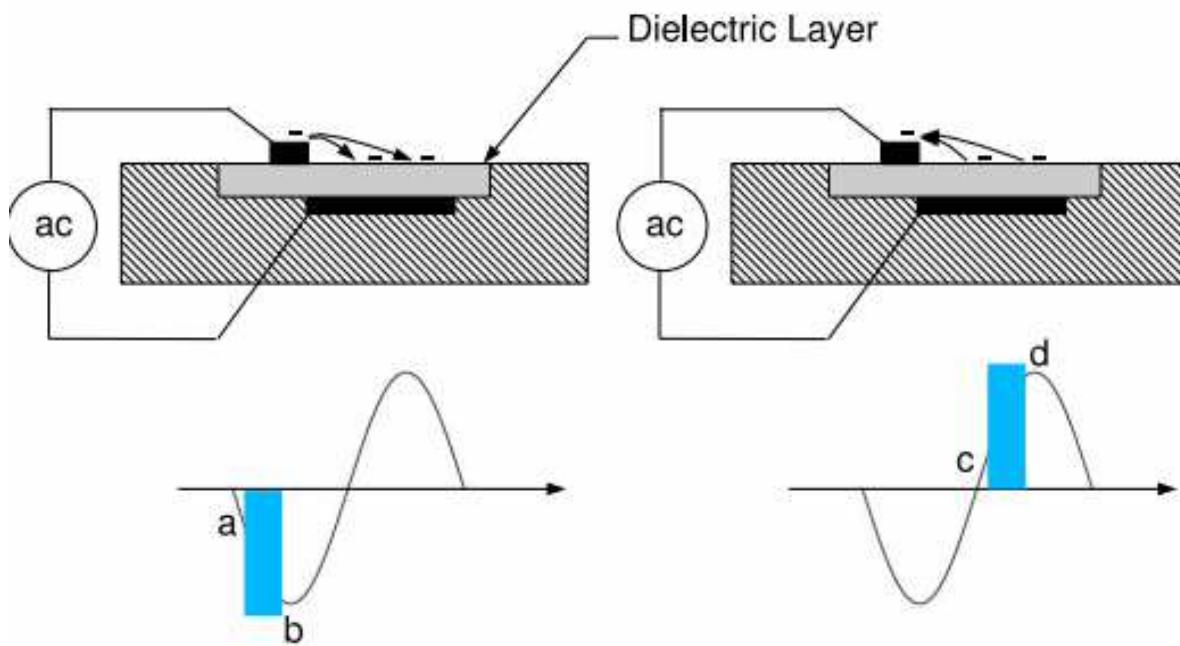
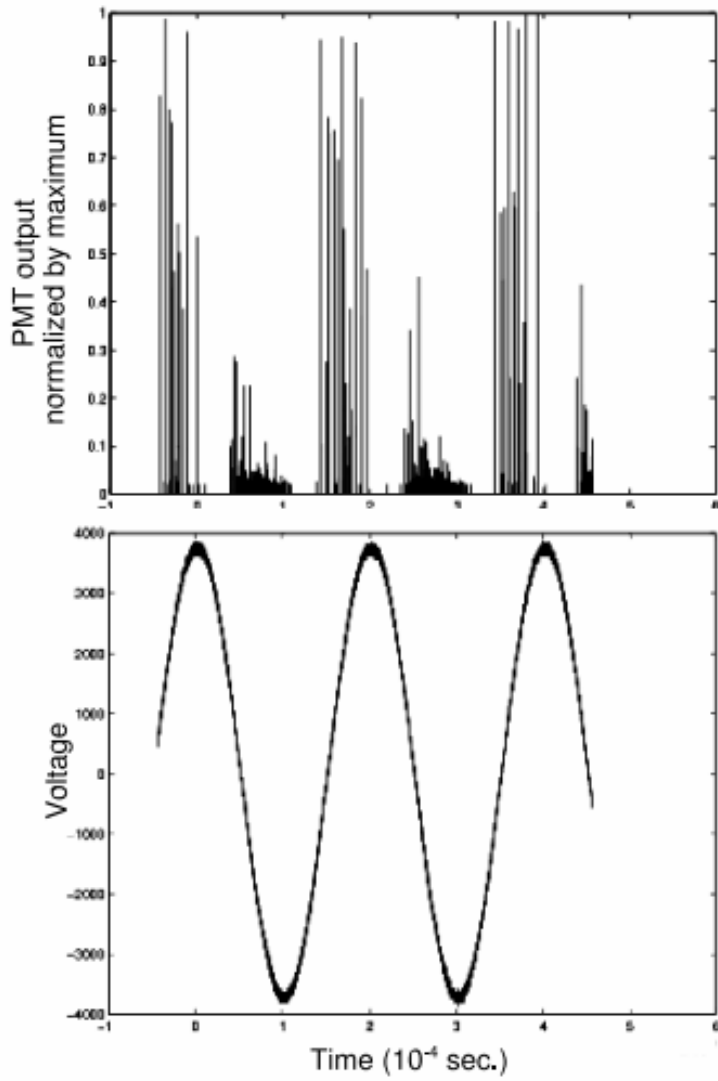


Рис. 2-1-14. Регистрация тока при положительном и отрицательном периоде напряжения.



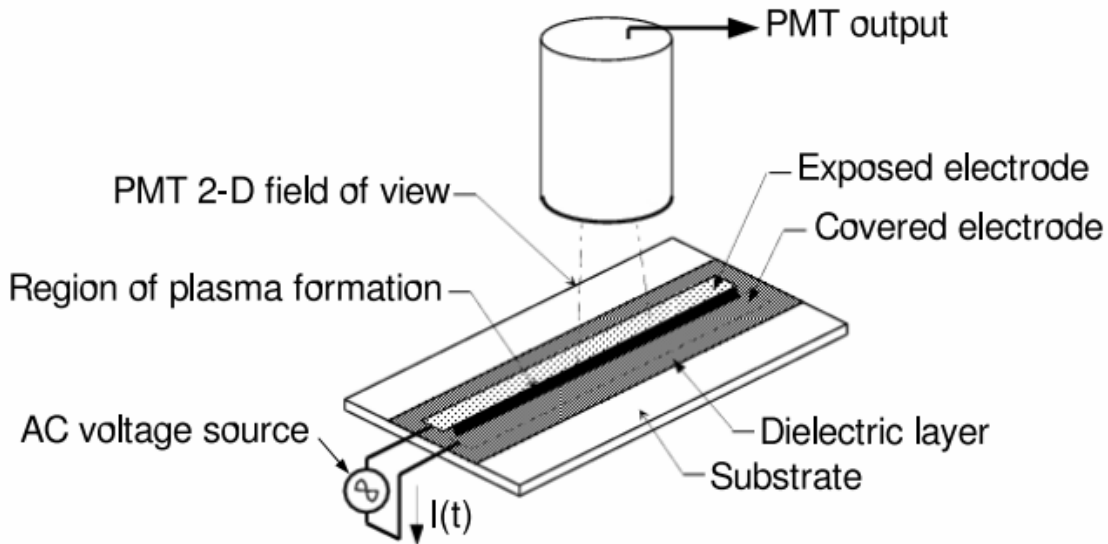


Рис. 2-1-15. Схема установки.

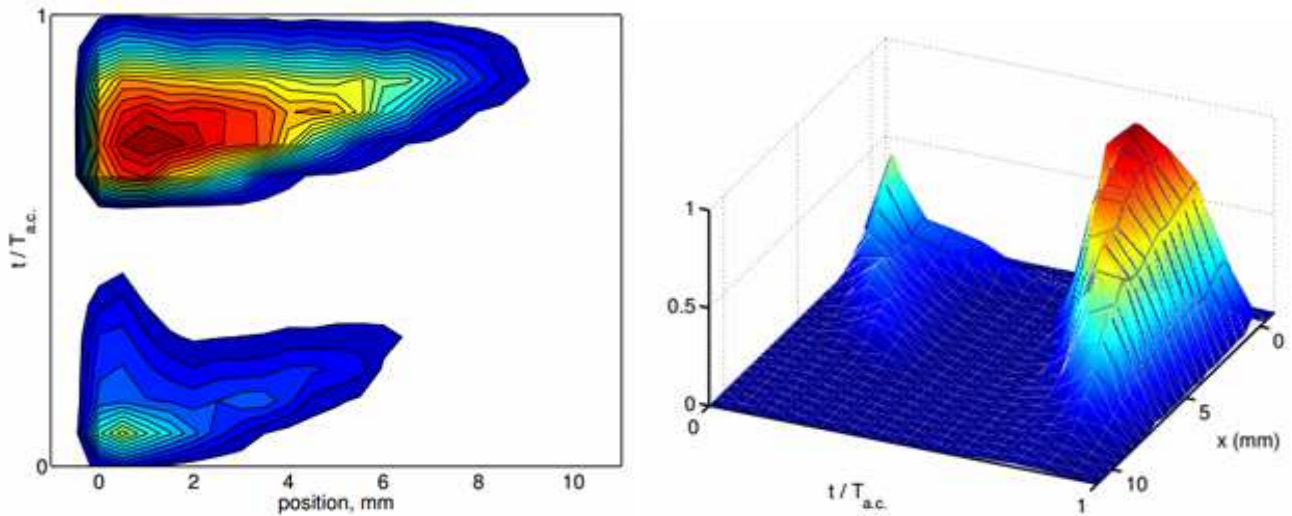


Рис. 2-1-16. Зависимость размера области светового излучения (стримера) от времени и от расстояния до передней кромки электрода, в течение одного периода изменения напряжения.

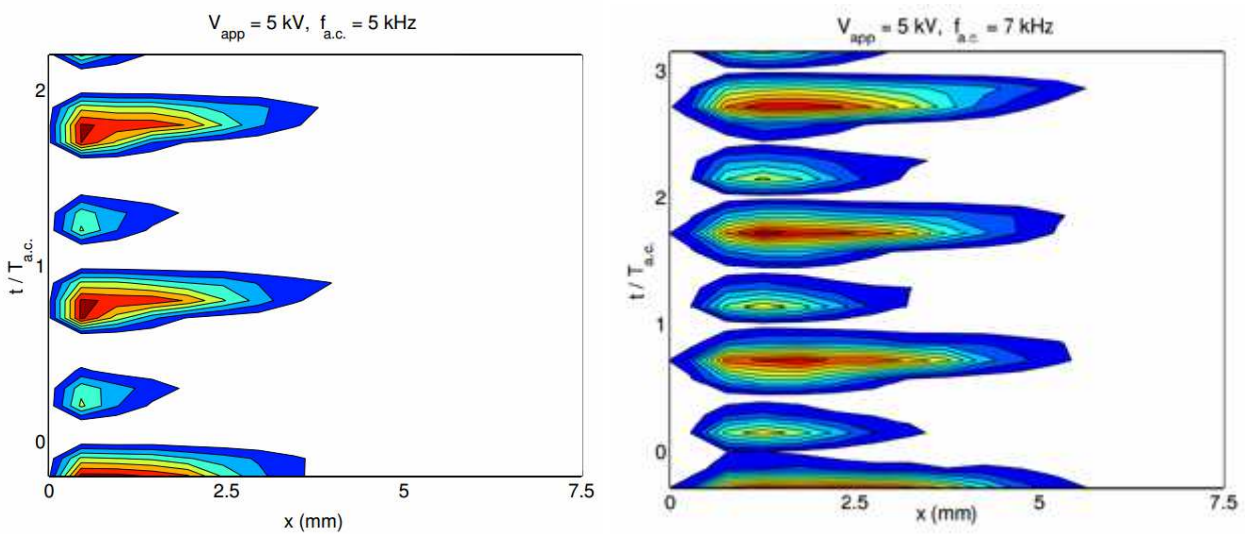


Рис. 2-1-17. Структура разряда при напряжении 5кВ, и частоте 5 и 7 кГц.

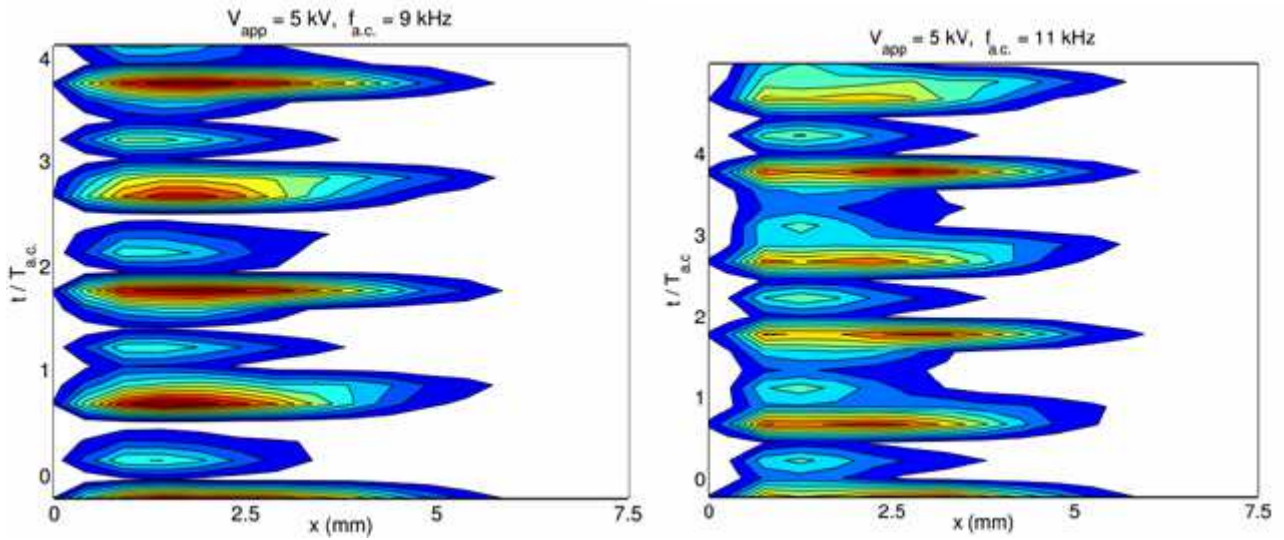


Рис. 2-1-18. Структура разряда при напряжении 5кВ, и частоте 9 и 11 кГц.

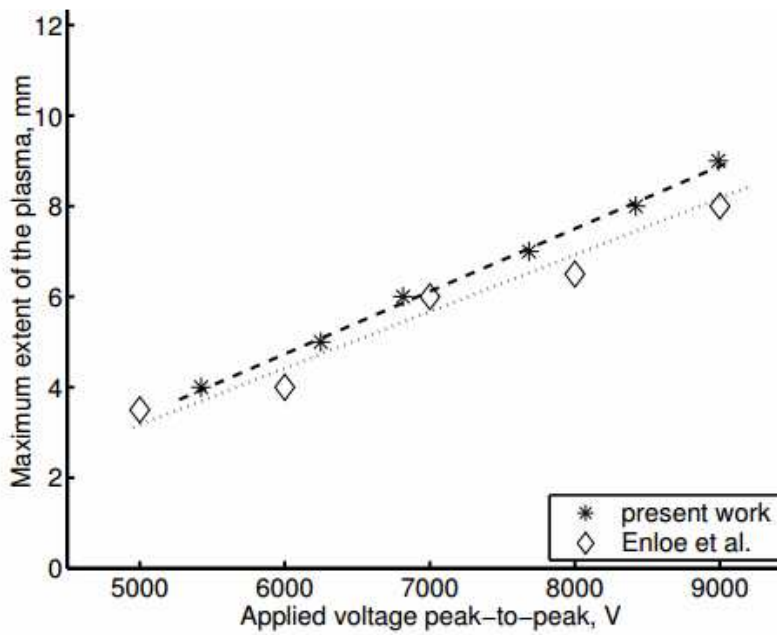


Рис. 2-1-19. Длина стримера (плазмы) в зависимости от напряжения.

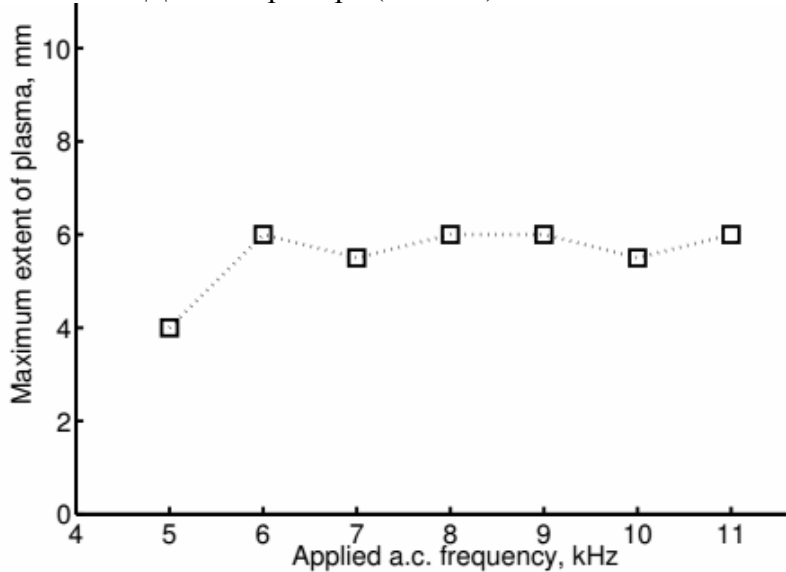


Рис. 2-1-20. Зависимость от частоты расстояния между максимумом интенсивности свечения и кромкой электрода. Практически не зависит от частоты.

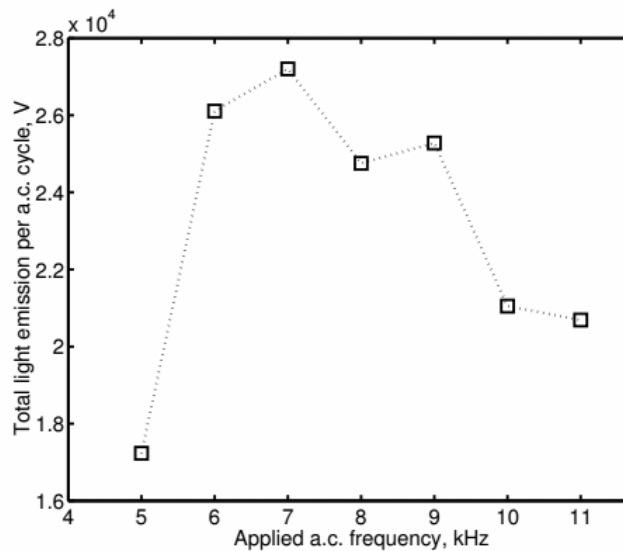


Рис. 2-1-21. Зависимость общей интенсивности свечения от частоты.

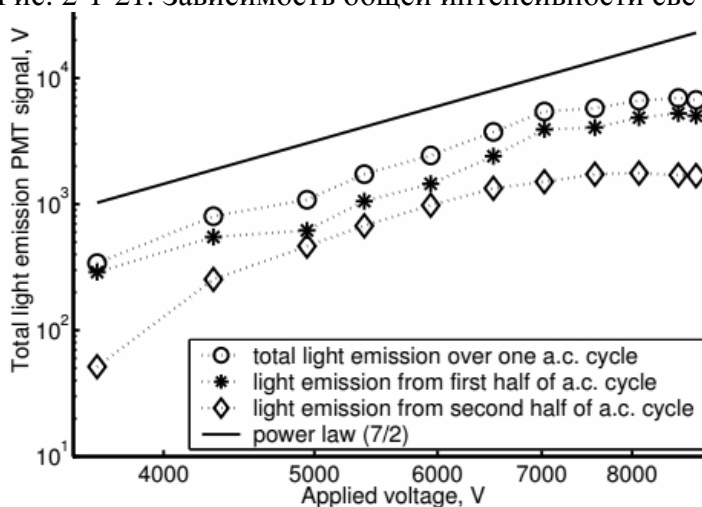


Рис. 2-1-22. Зависимость общей интенсивности свечения от напряжения.

-Thomas C. Corke, Martiqua L. Post, and Dmitriy M. Orlov. Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced. Aerodynamics: Physics, Modeling and Applications.+  
 2003-Orlov, D., Corke, T., and Haddad, O. DNS modeling of plasma array flow actuators. In Bulletin of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics (2003), vol. 48.  
 2006-Orlov, D., Corke, T., and Patel, M. Electric Circuit Model for Aerodynamic Plasma Actuator. AIAA Paper 2006-1206, 2006.  
 2006-Orlov D.M. Modelling and Simulation of Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. PhD thesis, Dissertation, University of Notre Dame, 2006. 189 pages.+

Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНИИ "ГОИ им. с.И. Вавилова", Санкт-Петербург.

Лаборатория фотодиссационных лазеров.

**Андреев С.И.**

1967-Андреев С.И. Применение поверхностного искрового разряда для накачки ОКГ. Журнал технической физики, 1967, 67, с.1527.

1975-Андреев С.И., Новикова Г.М. Исследование объемного разряда наносекундной длительности в воздухе при атмосферном давлении. Журнал технической физики. 1975. т.45. №8. с.1692-1703.+

1976-Андреев С.И. и др. Исследование скользящей искры в воздухе. Прикладная механика и техническая физика. 1976, №.3, с.38-43.

1976-Андреев О.И., Белоусова И.М., Дашук П.Н., Зарослов Д.Ю., Зобов Е.А., Карлов Н.В., Кузьмин Г.П., Никифоров С.М., Прохоров А.М., Челноков Л.Н., Ярышева М.Д. СО<sub>2</sub>-лазер, инициируемый скользящим разрядом. Письма в КЭТФ, 21, 424 (1976).

1976-Андреев С.И., Зобов Е.А., Сидоров А.Н. Метод управления развитием и формированием системы параллельных каналов скользящих искр в воздухе при атмосферном давлении. Прикладная механика и техническая физика. 1976. №3. с.12-17. (с.20)

1978-Андреев С.И., Зобов Е.А., Сидоров А.Н. Метод управления развитием и формированием системы параллельных каналов скользящих искр в воздухе при атмосферном давлении. Прикладная механика и техническая физика. 1978. №3. с.38-44.

1978-Андреев С.И. Зобов Е.А. Сидоров А.Н. Прикладная механика и техническая физика. 1978. №6. с.15.

1980-Андреев С.И., Зобов Е.А., Сидоров А.Н., Костоусов В.Д. Исследование длинной скользящей искры. Прикладная механика и техническая физика. 1980. №1. с.111-115.

1986-Зобов Е.А. Литвинова И.Г. Сидоров А.Н. Прикладная механика и техническая физика. 1986. №1. с.20.

1990-Агашков Ю.Ф., Зобов Е.А., Сидоров А.Н. Спектральные характеристики скользящей искры в инертных газах. ТВТ, 28:5 (1990), с.872-876.+

---

1998-Кучинский Г.С. Техника высоких напряжений. СПб. 1998. 700с.+

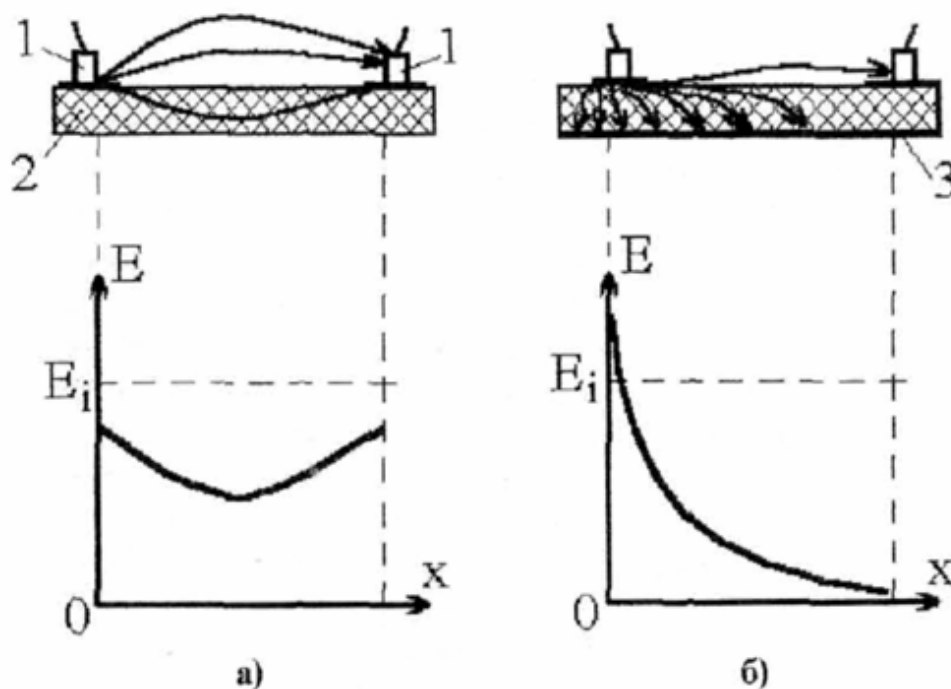


Рис. 2-1-23. Распределение напряженности электрического поля вдоль поверхности твердого диэлектрика, а-металлическая плоскость отсутствует, б-под диэлектриком имеется металлическая плоскость, соединенная с одним из электродов. 1-цилиндрический электрод, 2-диэлектрик, 3-металлическая плоскость.

В случае (б) нормальная составляющая поля становится существенно больше касательной составляющей. Чем тоньше диэлектрик, тем выше напряженность электрического поля, и тем ниже напряжение возникновения коронного разряда. При незначительном повышении напряжения коронный разряд переходит в стримерный, что визуально видно по появлению тонких нитей, развивающихся вдоль поверхности. При развитии разряда ток переноса в канале замыкается через диэлектрик в виде тока смещения. При этом на поверхности почти мгновенно возникает заряд, который снижает напряженность электрического поля в канале разряда у поверхности и ионизационные процессы в этой области прекращаются. Поэтому разряд развивается на некотором расстоянии от поверхности, слабо взаимодействуя с ней.

2006-Григорьев А.Н. Павленко А.В. Ильин А.П. Карнаухов Е.И. (Томск, ТПУ) Электрический разряд по поверхности твердого диэлектрика. Ч.1. Особенности развития и существования поверхностного разряда. Известия ТПИ. 2006. т.309. №1. с.66-69.+

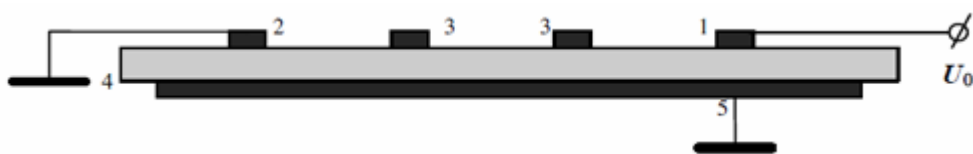


Рис. 2-1-24. Схема установки, 1-высоковольтный электрод, 2-заземляющий электрод, 3-экранирующие электроды, 4-диэлектрик, 5-заземленный электрод.

2006-Григорьев А.Н. Павленко А.В. Ильин А.П. Карнаухов Е.И. (Томск, ТПУ) Электрический разряд по поверхности твердого диэлектрика. Ч2. Исследование сильноточного коммутатора. Известия ТПИ. 2006. т.309. №2. с.79-82.+

2010-Chiba M. Propagation of surface leader discharge in atmospheric air. 2010.

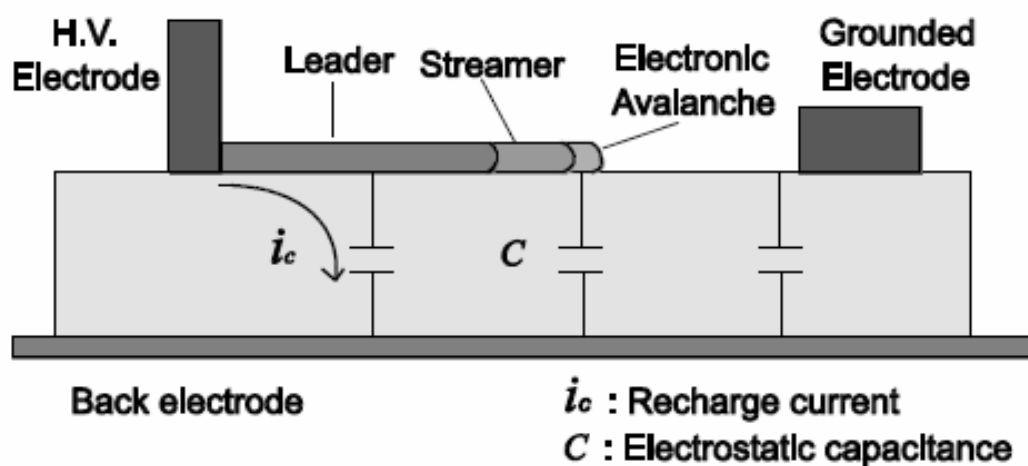


Рис. 2-1-25. Моделирование распространения разряда по поверхности.

## 2.2 Применение барьерного разряда в авиации для контроля потоков.

<http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.41588?journalCode=aiaaj>

David Greenblatt, Ronen Lautman. (2015) Inboard/outboard plasma actuation on a vertical-axis wind turbine. Renewable Energy 83, p.1147-1156

Young Joon Choi, Jayant Sirohi, Laxminarayan L Raja. (2015) Measurement of transient force produced by a propagating arc magnetohydrodynamic plasma actuator in quiescent atmospheric air. Journal of Physics D: Applied Physics 48, p.425204

Ricardo Pereira, Marios Kotsonis, Gaël de Oliveira, Daniele Ragni. (2015) Analysis of local frequency response of flow to actuation: Application to the dielectric barrier discharge plasma actuator. Journal of Applied Physics 118, p.153301

Lu Shen, Chih-yung Wen, Hsin-An Chen. (2015) Asymmetric Flow Control on a Delta Wing with Dielectric Barrier Discharge Actuators. AIAA Journal 0:0, p.1-7

- Sheila Shahidi, Mahmood Ghoranneviss, Sanaz Dalalsharifi. (2015) Preparation of multifunctional wool fabric using chitosan after plasma treatment. *The Journal of The Textile Institute* 106, p.1127-1134
- Elisa Pescini, Luca Francioso, Maria Grazia De Giorgi, Antonio Ficarella. (2015) Investigation of a Micro Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator for Regional Aircraft Active Flow Control. *IEEE Transactions on Plasma Science* 43, p.3668-3680
- Hiroyuki Nishida, Tomomi Shiraishi. (2015) Experimental Characterization of Dual-Grounded Tri-Electrode Plasma Actuator. *AIAA Journal* 0:0, p.1-5
- Marios Kotsonis. (2015) Diagnostics for characterisation of plasma actuators. *Measurement Science and Technology* 26, p.092001
- Michael Wicks, Flint O. Thomas. (2015) Effect of Relative Humidity on Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Body Force. *AIAA Journal* 53:9, p.2801-2805
- G. Correale, R. Winkel, M. Kotsonis. (2015) Energy deposition characteristics of nanosecond dielectric barrier discharge plasma actuators: Influence of dielectric material. *Journal of Applied Physics* 118, p.083301
- Marco Belan, Federico Messanelli. (2015) Compared ionic wind measurements on multi-tip corona and DBD plasma actuators. *Journal of Electrostatics* 76, p.278-287
- Michael Wicks, Flint O. Thomas, Thomas C. Corke, Mehul Patel, Alan B. Cain. (2015) Mechanism of Vorticity Generation in Plasma Streamwise Vortex Generators. *AIAA Journal* 0:0, p.1-10
- Gael de Oliveira, Ricardo Balbino Santos Pereira, Daniele Ragni, Marios Kotsonis. 2015. Modeling DBD Plasma Actuators in Integral Boundary Layer Formulation for Application in Panel Methods. 46th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.
- Ciprian Dumitrache, Azer P. Yalin. 2015. Laser-Induced Heating Using a Non-Resonant Dual-Pulse Approach with Application to Laser Ignition. 46th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.
- Bhavini Singh, Mounia Belmouss, Sally P. Bane. 2015. Characterization of Flow Control Actuators Based on Spark Discharge Plasmas Using Particle Image Velocimetry. 46th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.
- Zijie Zhao, Jiun-Ming Li, Jianguo Zheng, Y. D. Cui, B. C. Khoo. (2015) Study of Shock and Induced Flow Dynamics by Nanosecond Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuators. *AIAA Journal* 53:5, 1336-1348
- C. K. Gilmore, S. R. H. Barrett. (2015) Electrohydrodynamic thrust density using positive corona-induced ionic winds for in-atmosphere propulsion. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 471, p.20140912-20140912
- Jeff B. Laten, Raymond P. LeBeau. 2015. Examination of a Plasma Actuator Model Applied to DBD Actuators for Small Aircraft Applications. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting.
- Hiroyuki Nishida, Taku Nonomura, Takashi Abe. 2015. Numerical Study of Three-dimensional Effects of Plasma Structure on Flow Field around DBD Plasma Actuator. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting.

Jillian Kiser, Kenny S. Breuer. 2015. An Out-of-Plane Velocity Component in Dielectric Barrier Discharge Actuator Flow. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting.

Alfram V. Bright, Nathan R. Tichenor, Richard Wlezien. 2015. The Effects of Laser Plasma Discharge on a Separating Boundary Layer. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting.

Sergey B. Leonov, Igor V. Adamovich, Vitaly Petrishchev. 2015. Dynamics of charge transfer and energy coupling in surface discharges on  $\mu\text{s}$  to  $\text{msec}$  time scales. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting.

Jiayang Yu, Fu Chen, Huaping Liu, Yanping Song. (2015) Numerical Study of Fluid Dynamics and Heat Transfer Induced by Plasma Discharges. *Plasma Science and Technology* 17, p.41-49

Massiel Zadeh, V. Rohani, F. Cauneau, F. Fabry, L. Fulcheri. (2015) Toward the Design of Multi Asymmetric Surface Dielectric Barrier Discharge (ASDBD) Actuators. *Plasma Science and Technology* 17, p.56-63

Jae-San Yoon, Jae-Hung Han. (2015) Semiempirical Thrust Model of Dielectric Barrier Plasma Actuator for Flow Control. *Journal of Aerospace Engineering* 28, p.04014041

P. Sujar-Garrido, N. Benard, E. Moreau, J. P. Bonnet. (2015) Dielectric barrier discharge plasma actuator to control turbulent flow downstream of a backward-facing step. *Experiments in Fluids* 56:4

Michael J. Johnson, David B. Go. (2014) Ferroelectric crystals for the low-voltage operation of surface dielectric barrier discharges. *Applied Physics Letters* 105, p.264102

R Pereira, G J W van Bussel, W A Timmer. (2014) Active stall control for large offshore horizontal axis wind turbines; a conceptual study considering different actuation methods. *Journal of Physics: Conference Series* 555, p.012082

P Audier, H Rabat, A Leroy, D Hong. (2014) Experimental investigation of a surface DBD plasma actuator at atmospheric pressure in different  $\text{N}_2/\text{O}_2$  gas mixtures. *Plasma Sources Science and Technology* 23, p. 065045

M Zadeh, V Rohani, F Cauneau, F Fabry, L Fulcheri. (2014) Toward the Design of Multi Asymmetric Surface Dielectric Barrier Discharge (ASDBD) Actuators. *Journal of Physics: Conference Series* 550, p.012041

Sergey B Leonov, Vitaly Petrishchev, Igor V Adamovich. (2014) Dynamics of energy coupling and thermalization in barrier discharges over dielectric and weakly conducting surfaces on  $\mu\text{s}$  to  $\text{ms}$  time scales. *Journal of Physics D: Applied Physics* 47, p.465201

Nicolas Benard, Eric Moreau. (2014) Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control. *Experiments in Fluids* 55

Jae-San Yoon, Jae-Hung Han. (2014) One-equation modeling and validation of dielectric barrier discharge plasma actuator thrust. *Journal of Physics D: Applied Physics* 47, p.405202

Amos Ben-Harav, David Greenblatt. (2014) Plasma-based feed-forward dynamic stall control on a vertical axis wind turbine. *Wind Energy*, n/a-n/a

Ahmed Eltaweel, Meng Wang, Dongjoo Kim, Flint O. Thomas, Alexey V. Kozlov. (2014) Numerical investigation of tandem-cylinder noise reduction using plasma-based flow control. *Journal of Fluid Mechanics* 756, p.422-451.

Christopher L. Kelley, Patrick O. Bowles, John Cooney, Chuan He, Thomas C. Corke, Bradley A. Osborne, Joseph S. Silkey, Joseph Zehnle. (2014) Leading-Edge Separation Control Using Alternating-Current and Nanosecond-Pulse Plasma Actuators. *AIAA Journal* 52:9, p.1871-1884

Borui Zheng, Yaqing Liu, Chao Gao, Yibin Li. (2014) Design and Application of Multichannel Peristaltic Acceleration Pulsed Plasma Power Supply. *IEEE Transactions on Plasma Science* 42, p.1902-1908

Rakshit Tirumala, Nicolas Benard, Eric Moreau, Matthieu Fenot, Gildas Lalizel, Eva Dorignac. (2014) Temperature characterization of dielectric barrier discharge actuators: influence of electrical and geometric parameters. *Journal of Physics D: Applied Physics* 47, p.255203.

Giuseppe Correale, Marios Kotsonis. 2014. Effect of dielectric material on thermal effect produced by ns-DBD plasma actuator. 45th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.

Jung Hoon Kim, Laith Al-Sadawi, Alexandros Vathylakis, Tze Pei Chong. 2014. Trailing Edge Noise Reduction by Passive and Active Flow Controls. 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference.

Ciprian Dumitrache, Azer P. Yalin, Mikhail N. Shneider. 2014. Laser Generated Plasma Using a Dual Pulse Approach with Application to Laser Ignition. 45th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.

Chi Wai Wong, Longjun Wang, Zhi Wu, Chenghan Li, Md. Mahbub Alam, Yu Zhou. 2014. Control of Separated Flow on a NACA 0015 Airfoil using Three-Dimensional Plasma Actuator. 7th AIAA Flow Control Conference.

M. Abdollahzadeh, J.C. Pascoa, P.J. Oliveira. (2014) Modified Split-Potential Model for Modeling the Effect of DBD Plasma Actuators in High Altitude Flow Control. *Current Applied Physics*

Gabriele Neretti, Andrea Cristofolini, Carlo A. Borghi. (2014) Experimental investigation on a vectorized aerodynamic dielectric barrier discharge plasma actuator array. *Journal of Applied Physics* 115, p.163304

Hiroyuki Nishida, Taku Nonomura, Takashi Abe. (2014) Three-dimensional simulations of discharge plasma evolution on a dielectric barrier discharge plasma actuator. *Journal of Applied Physics* 115, p.133301

Sheila Shahidi, Mahmood Ghoranneviss, Sanaz Dalal Sharifi. (2014) Effect of Atmospheric Pressure Plasma Treatment/ Followed by Chitosan Grafting on Antifelting and Dyeability of Wool Fabric. *Journal of Fusion Energy* 33, p.177-183

David Greenblatt, Amos Ben-Harav, Hanns Mueller-Vahl. (2014) Dynamic Stall Control on a Vertical-Axis Wind Turbine Using Plasma Actuators. *AIAA Journal* 52:2, p.456-462

Robyn A. Dawson, Jesse Little. (2014) Effects of pulse polarity on nanosecond pulse driven dielectric barrier discharge plasma actuators. *Journal of Applied Physics* 115, p.043306

Ronald E. Hanson, Nicole M. Houser, Philippe Lavoie. (2014) Dielectric material degradation monitoring of dielectric barrier discharge plasma actuators. *Journal of Applied Physics* 115, p.043301

Jeff Laten, Raymond P. LeBeau. 2014. Investigation of an Improved Design for a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator for Flight Control of an Inflatable Wing. 52nd Aerospace Sciences Meeting.



Zijie Zhao, Jiun-Ming Li, Jianguo Zheng, Yongdong Cui, Boo Cheong Khoo. 2014. Study of shock and induced flow dynamics by pulsed nanosecond DBD plasma actuators. 52nd Aerospace Sciences Meeting.

Arjen de Jong, Hester Bijl. (2014) Corner-Type Plasma Actuators for Cavity Flow-Induced Noise Control. *AIAA Journal* 52:1, p.33-42

Takashi MATSUNO, Kengo MAEDA, Noboru FUJITA, Kenichi HARUNA, Gouji YAMADA, Hiromitsu KAWAZOE. (2014) On the mechanism of bluff body flow control by pulsed plasma actuator. *Journal of Fluid Science and Technology* 9, p.JFST0048-JFST0048

Shunsuke FUNAOKA, Shunsuke YAMADA, Seiji ICHIKAWA, Hitoshi ISHIKAWA. (2014) Interaction of streamwise vortex pair induced by counter type plasma jet with flow past a circular cylinder. *Journal of Fluid Science and Technology* 9, p.JFST0050-JFST0050

James Dedrick, Seong-kyun Im, Mark Cappelli, Rod W. Boswell, Christine Charles. (2013) Induced Flow and Optical Emission Generated by a Pulsed 13.56 MHz & 5 kHz Plasma Actuator. *IEEE Transactions on Plasma Science* 41, p.3275-3278

J Dedrick, S Im, M A Cappelli, R W Boswell, C Charles. (2013) Surface discharge plasma actuator driven by a pulsed 13.56 MHz–5 kHz voltage waveform. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, p.405201

Jin-Jun Wang, Kwing-So Choi, Li-Hao Feng, Timothy N. Jukes, Richard D. Whalley. (2013) Recent developments in DBD plasma flow control. *Progress in Aerospace Sciences* 62, p.52-78

Ayumu Inasawa, Chiho Ninomiya, Masahito Asai. (2013) Suppression of Tonal Trailing-Edge Noise From an Airfoil Using a Plasma Actuator. *AIAA Journal* 51:7, p.1695-1702

Robert Dawson, Jesse C. Little. 2013. Effects of Pulse Polarity on Nanosecond Pulse Driven Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. 43rd Fluid Dynamics Conference.

Timothy G. Nichols, Joshua L. Rovey. (2013) Surface Potential and Electric Field Measurements in Plasma Actuators at Low Pressure. *AIAA Journal* 51:5, p.1054-1065

R Jousot, A Leroy, R Weber, H Rabat, S Loyer, D Hong. (2013) Plasma morphology and induced airflow characterization of a DBD actuator with serrated electrode. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, p.125204

J Mizeraczyk, J Podlinski, A Niewulis, A Berendt. (2013) Recent progress in experimental studies of electro-hydrodynamic flow in electrostatic precipitators. *Journal of Physics: Conference Series* 418, 012068

Stanislav V. Gordeyev, Flint O. Thomas. (2013) A temporal proper decomposition (TPOD) for closed-loop flow control. *Experiments in Fluids* 54

J Kriegseis, C Schwarz, C Tropea, S Grundmann. (2013) Velocity-information-based force-term estimation of dielectric-barrier discharge plasma actuators. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, 055202

A. Greig, C. H. Birzer, M. Arjomandi. (2013) Atmospheric Plasma Thruster: Theory and Concept. *AIAA Journal* 51:2, p.362-371

Mathias Neumann, Christian Friedrich, Jürgen Czarske, Jochen Kriegseis, Sven Grundmann. (2013) Determination of the phase-resolved body force produced by a dielectric barrier discharge plasma actuator. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, 042001

Sergei Chernyshev, Aleksandr Kuryachii, Sergey Manuilovich, Dmitry Rusyanov, Vladimir Skvortsov. 2013. Attenuation of cross-flow-type instability in compressible boundary layer by means of plasma actuators. 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.

Jochen Kriegseis, Alexander Duchmann, Sven Grundmann, Cameron Tropea. 2013. Comprehensive Effectiveness and Efficiency Evaluation of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.

John Murphy, Philippe Lavoie. 2013. Characterization of DBD Plasma Actuators via PIV Measurements. 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.

2013. Parametric Investigation of Nanosecond Pulse Driven Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Aerodynamic Flow Control. 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.

David Greenblatt, Amos Ben Harav, Hanns Mueller-Vahl. 2013. VAWT Transients following DBD Pulsed Plasma Flow Control. 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.

J. P. Murphy, J. Kriegseis, P. Lavoie. (2013) Scaling of maximum velocity, body force, and power consumption of dielectric barrier discharge plasma actuators via particle image velocimetry. *Journal of Applied Physics* 113, 243301

Robert Dawson, Jesse Little. (2013) Characterization of nanosecond pulse driven dielectric barrier discharge plasma actuators for aerodynamic flow control. *Journal of Applied Physics* 113, 103302

Jignesh Soni, Subrata Roy. (2013) Low pressure characterization of dielectric barrier discharge actuators. *Applied Physics Letters* 102, 112908

Snir Goyta, Hanns Mueller-Vahl, David Greenblatt. (2013) Tethered cube stabilization by means of leading-edge DBD plasma actuation. *Experiments in Fluids* 54

J. Kriegseis, A. Duchmann, C. Tropea, S. Grundmann. (2013) On the classification of dielectric barrier discharge plasma actuators: A comprehensive performance evaluation study. *Journal of Applied Physics* 114, 053301

Y.E. Akansu, F. Karakaya, A. Şanlısoy, Petra Dančová, Petr Novontý. (2013) Active Control of Flow around NACA 0015 Airfoil by Using DBD Plasma Actuator. *EPJ Web of Conferences* 45, 01008

Jochen Kriegseis, Benjamin Möller, Sven Grundmann, Cameron Tropea. (2012) On Performance and Efficiency of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control Applications. *International Journal of Flow Control* 4, p.125-132

M. Kotsonis, S. Ghaemi. (2012) Experimental and numerical characterization of a plasma actuator in continuous and pulsed actuation. *Sensors and Actuators A: Physical* 187, 84-94

Ryan Durscher, Subrata Roy. (2012) Evaluation of thrust measurement techniques for dielectric barrier discharge actuators. *Experiments in Fluids* 53, p.1165-1176

- Joseph A. Valerioti, Thomas C. Corke. (2012) Pressure Dependence of Dielectric Barrier Discharge Plasma Flow Actuators. *AIAA Journal* 50:7, p.1490-1502
- Robert Dawson, Jesse Little. 2012. Characterization of Nanosecond Pulse Driven Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Aerodynamic Flow Control. 6th AIAA Flow Control Conference.
- Justin Zito, David Arnold, Tomas Houba, Jignesh Soni, Ryan Durscher, Subrata Roy. 2012. Microscale Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators: Performance Characterization and Numerical Comparison. 43rd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.
- Rasool Erfani, Hossein Zare-Behtash, Konstantinos Kontis. (2012) Influence of shock wave propagation on dielectric barrier discharge plasma actuator performance. *Journal of Physics D: Applied Physics* 45, 225201
- Jesse Little, Keisuke Takashima, Munetake Nishihara, Igor Adamovich, Mo Samimy. (2012) Separation Control with Nanosecond-Pulse-Driven Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. *AIAA Journal* 50:2, p.350-365
- M Kotsonis, S Ghaemi. (2012) Performance improvement of plasma actuators using asymmetric high voltage waveforms. *Journal of Physics D: Applied Physics* 45, 045204
- V R Soloviev. (2012) Analytical estimation of the thrust generated by a surface dielectric barrier discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics* 45, 025205
- B A Gibson, M Arjomandi, R M Kelso. (2012) The response of a flat plate boundary layer to an orthogonally arranged dielectric barrier discharge actuator. *Journal of Physics D: Applied Physics* 45, 025202
- Ryan Durscher, Subrata Roy. (2012) Aerogel and ferroelectric dielectric materials for plasma actuators. *Journal of Physics D: Applied Physics* 45, 012001
- David Ashpis, Matthew Laun, Elmer Griebeler. 2012. Progress toward Accurate Measurements of Power Consumption of DBD Plasma Actuators. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.
- Michael Wicks, Flint Thomas, David Schatzman, Patrick Bowles, Thomas Corke, Mehul Patel, Alan Cain. 2012. A Parametric Investigation of Plasma Streamwise Vortex Generator Performance. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.
- Jochen Kriegseis, Clemens Schwarz, Alexander Duchmann, Sven Grundmann, Cameron Tropea. 2012. PIV-based estimation of DBD plasma-actuator force terms. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.
- Mark Riherd, Subrata Roy. (2012) Measurements and simulations of a channel flow powered by plasma actuators. *Journal of Applied Physics* 112, 053303
- N. Benard, E. Moreau. (2012) Role of the electric waveform supplying a dielectric barrier discharge plasma actuator. *Applied Physics Letters* 100, 193503
- Justin C. Zito, Ryan J. Durscher, Jignesh Soni, Subrata Roy, David P. Arnold. (2012) Flow and force inducement using micron size dielectric barrier discharge actuators. *Applied Physics Letters* 100, 193502

- Philippe Versailles, Wajid Ali Chishty, Huu Duc Vo. (2012) Application of Dielectric Barrier Discharge to Improve the Flashback Limit of a Lean Premixed Dump Combustor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 134, 031501
- Ryan Durscher, Scott Stanfield, Subrata Roy. (2012) Characterization and manipulation of the “saturation” effect by changing the surface temperature of a dielectric barrier discharge actuator. *Applied Physics Letters* 101, 252902
- David Greenblatt, Magen Schulman, Amos Ben-Harav. (2012) Vertical axis wind turbine performance enhancement using plasma actuators. *Renewable Energy* 37, p.345-354
- Chris Rethmel, Jesse Little, Keisuke Takashima, Aniruddha Sinha, Igor Adamovich, Mo Samimy. (2011) Flow Separation Control Using Nanosecond Pulse Driven DBD Plasma Actuators. *International Journal of Flow Control* 3, p.213-232
- ZhiFeng Liu, LianZe Wang, Song Fu. (2011) Study of flow induced by sine wave and saw tooth plasma actuators. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy* 54, p.2033-2039
- M. Cheong, A. Greig, B. Gibson, M. Arjomandi. (2011) An investigation into the effect of electric field on the performance of Dielectric Barrier Discharge plasma actuators. *Experimental Thermal and Fluid Science* 35, p.1600-1607
- Alexey V. Kozlov, Flint O. Thomas. (2011) Plasma Flow Control of Cylinders in a Tandem Configuration. *AIAA Journal* 49:10, p.2183-2193
- A. P. Kuryachii, D. A. Rus’yanov, V. V. Skvortsov, S. L. Chernyshev. (2011) Modeling the system of electrogasdynamic final-control elements. *Fluid Dynamics* 46, p.764-774
- Alexey V. Kozlov, Flint O. Thomas. (2011) Bluff-Body Flow Control via Two Types of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuation. *AIAA Journal* 49:9, p.1919-1931
- Satoshi Sekimoto, Kengo Asada, Tatsuya Usami, Shinichiro Ito, Taku Nonomura, Akira Oyama, Kozo Fujii. 2011. Experimental Study of Effects of Frequency for Burst Wave on DBD Plasma Actuator for Separation Control. 41st AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit.
- Ryan Durscher, Subrata Roy. 2011. Force Measurement Techniques and Preliminary Results Using Aerogels and Ferroelectrics for Dielectric Barrier Discharge Actuators. 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.
- Philippe Versailles, Shubhankar Ghosh, Huu Duc Vo, Christian Masson. (2011) Preliminary Assessment of Wind Turbine Blade Lift Control via Plasma Actuation. *Wind Engineering* 35, p.339-356
- Louis N. Cattafesta, Mark Sheplak. (2011) Actuators for Active Flow Control. *Annual Review of Fluid Mechanics* 43, p.247-272
- Ryan Durscher, Subrata Roy. 2011. On Multi-Barrier Plasma Actuators. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.
- Jochen Kriegseis, Benjamin Möller, Sven Grundmann, Cameron Tropea. 2011. Light Emission, Discharge Capacitance and Thrust Production of DBD Plasma Actuators. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.

Chris Rethmel, Jesse Little, K. Takashima, A. Sinha, Igor Adamovich, Mo Samimy. 2011. Flow Separation Control over an Airfoil with Nanosecond Pulse Driven DBD Plasma Actuators. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.

Alexander Fedorov, V. Krivtsov, Victor Soloviev, Vitaly Soudakov. 2011. Modeling of Aerodynamic Forcing Induced by Surface Dielectric Barrier Discharge. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.

Victor Soloviev, V. Krivtsov. 2011. Phenomenological Model of the Body Force Induced by Surface Dielectric Barrier Discharge. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.

J. Kriegseis, S. Grundmann, C. Tropea. (2011) Power consumption, discharge capacitance and light emission as measures for thrust production of dielectric barrier discharge plasma actuators. *Journal of Applied Physics* 110, 013305

BENJAMIN E. MERTZ, THOMAS C. CORKE. (2011) Single-dielectric barrier discharge plasma actuator modelling and validation. *Journal of Fluid Mechanics* 669, 557

Neal E. Fine, Steven J. Brickner. (2010) Plasma Catalysis for Enhanced-Thrust Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. *AIAA Journal* 48:12, p.2979-2982

Jesse Little, Mo Samimy. (2010) High-Lift Airfoil Separation with Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuation. *AIAA Journal* 48:12, p.2884-2898

Gilles Boesch, Huu Duc Vo, Bruno Savard, Christelle Wanko-Tchatchouang, Njuki W. Mureithi. (2010) Flight Control Using Wing-Tip Plasma Actuation. *Journal of Aircraft* 47:6, p.1836-1846

David M. Schatzman, Flint O. Thomas. (2010) Turbulent Boundary-Layer Separation Control with Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. *AIAA Journal* 48:8, p.1620-1634

Jesse Little, Keisuke Takashima, Munetake Nishihara, Igor Adamovich, Mo Samimy. 2010. High Lift Airfoil Leading Edge Separation Control with Nanosecond Pulse DBD Plasma Actuators. 5th Flow Control Conference.

Romain Joussot, Vincent Boucinha, Régine Weber-Rozenbaum, Hervé Rabat, Annie Leroy-Chesneau, Dunpin Hong. 2010. Thermal Characterization of a DBD Plasma Actuator: Dielectric Temperature Measurements Using Infrared Thermography. 40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit.

Dkong Kwak, Robert Nelson. 2010. Vortical Flow Control over Delta Wings with Different Sweep Back Angles Using DBD Plasma Actuator. 5th Flow Control Conference.

Nicolas Benard, Eric Moreau. 2010. Effects of Altitude on the Electromechanical Characteristics of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. Effects of Altitude on the Electromechanical Characteristics of a Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator. 41st Plasmadynamics and Lasers Conference.

Flint Thomas, Alexey Kozlov. 2010. Plasma Flow Control of Cylinders in a Tandem Configuration. 5th Flow Control Conference.

Jesse Little, Mo Samimy. 2010. Control of Separation from the Flap of a High-Lift Airfoil with DBD Plasma Actuation. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.

M. Kotsonis, L. Veldhuis. (2010) Experimental study on dielectric barrier discharge actuators operating in pulse mode. *Journal of Applied Physics* 108, 113304

Sergey Leonov, Dmitry Opaits, Richard Miles, Victor Soloviev. (2010) Time-resolved measurements of plasma-induced momentum in air and nitrogen under dielectric barrier discharge actuation. *Physics of Plasmas* 17, 113505

Dorian F. Colas, Antoine Ferret, David Z. Pai, Deanna A. Lacoste, Christophe O. Laux. (2010) Ionic wind generation by a wire-cylinder-plate corona discharge in air at atmospheric pressure. *Journal of Applied Physics* 108, 103306

R. Mestiri, R. Hadaji, S. Ben Nasrallah. (2010) An experimental study of a plasma actuator in absence of free airflow: Ionic wind velocity profile. *Physics of Plasmas* 17, 083503.

---

## Глава 3. Распространение разряда по поверхности диэлектрика, скользящий разряд.

### 3.1 Скользящий разряд от точечного электрода.

1948-Allibone T.E. Journ. Inst. Electr. Eng. 1938. 82. p.513.

Он исследовал разряд между острием и плоскостью, расположенной сбоку.

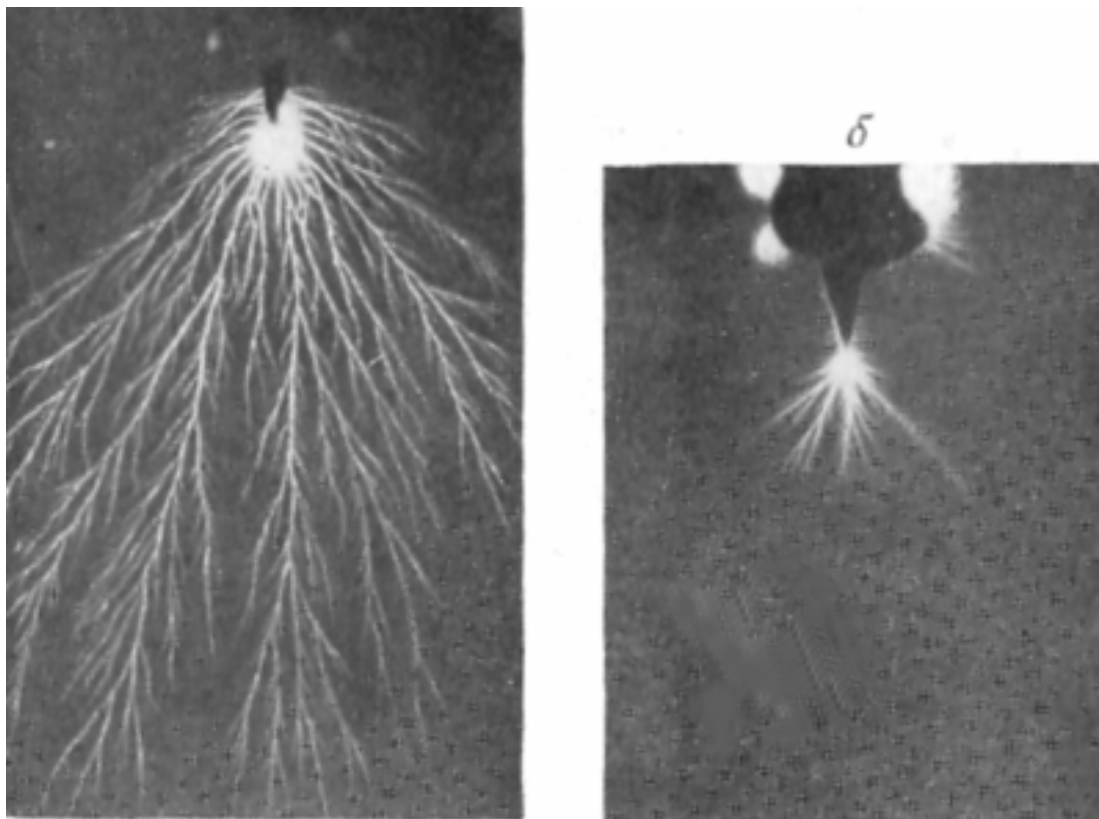


Рис. 3-1-1. Фигура Лихтенберга, слева-положительное напряжение на острие, справа-отрицательное напряжение на острие.

-----  
**1991-Базелян Эдуард Меерович** д.т.н. проф. зав. лабораторией молниезащиты Энергетический Институт (ЭНИИ) им. Г.М. Кржижановского

1991-Базелян Э.М. Искровой разряд в грунте. Электричество. 1991. №11. с.27-32.+

Распространение разряда вдоль диэлектрика. Волна ионизации стартует от острия и скользит в газе вдоль тонкой диэлектрической пленки, покрывающей заземленную металлическую поверхность. При малой толщине пленки (десятки микрон) и относительной диэлектрической проницаемости 5 (полимеры) результирующая погонная емкость плазменного канала может быть на 2-3 порядка больше, чем у такого же канала в газе. При напряжении 10-20кВ удавалось формировать скользящие искровые каналы длиной в несколько метров. При этом разряд развивается именно в воздухе. Материал диэлектрика в образовании плазмы участия не принимает.

Чем тоньше пленка, тем больше емкость канала, тем длиннее разряд.

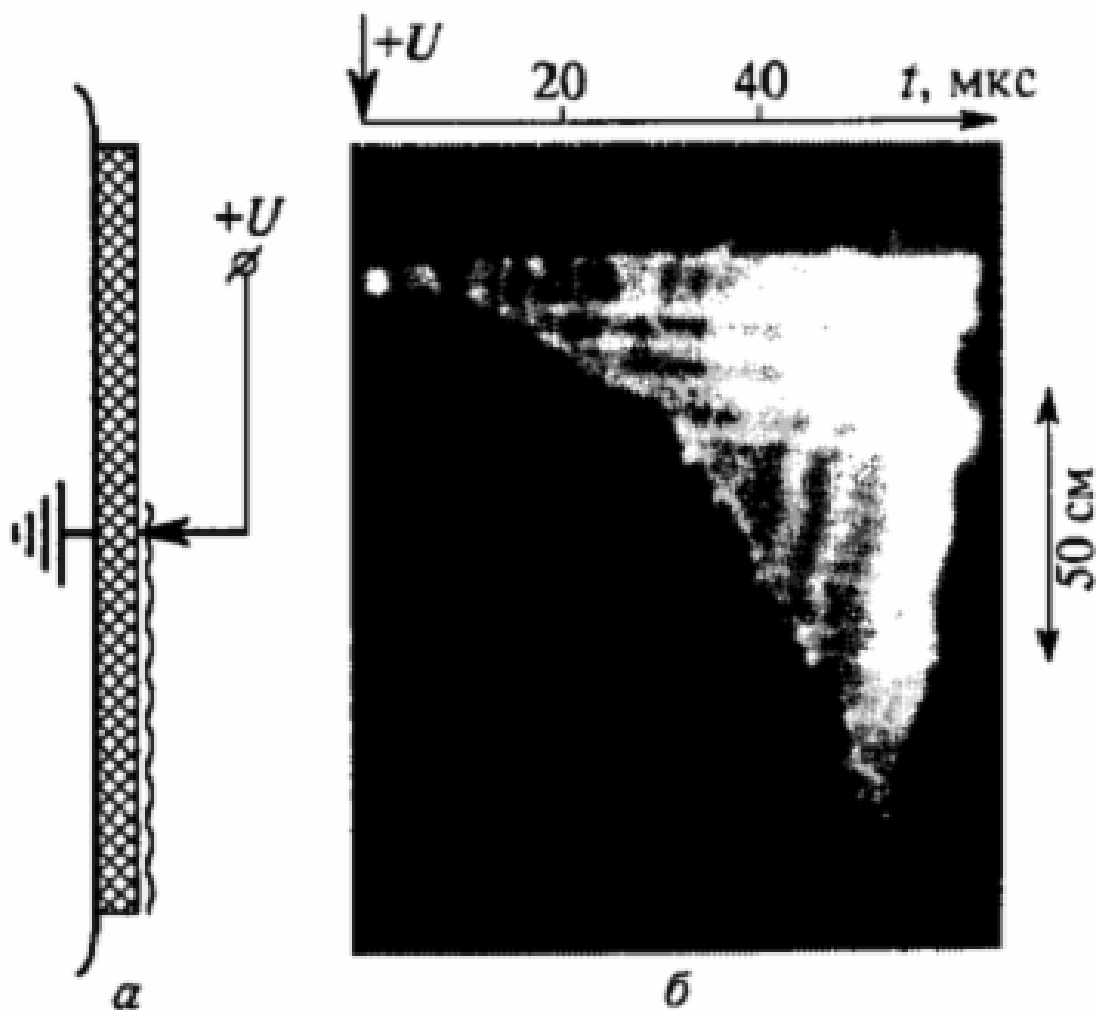


Рис. 3-1-2. Принципиальная схема и фоторазвертка скользящего разряда в воздухе от стержневого электрода вдоль листа оргстекла толщиной 4мм, расположенного на заземленной плоскости, служащей катодом.

Подавался положительный импульс с длительностью фронта 70мкс. В момент перекрытия напряжение равнялось 100кВ, что в 5 раз меньше, чем необходимо для лидера в воздушном промежутке такой же длины.

-----  
**1998-Журавлев О.А.** Самара, Самарский государственный аэрокосмический институт.  
 2003-Шорин В.П., Журавлев О.А., Ивченко А.В. Результаты зондовых измерений потенциала на поверхности диэлектрика с униполярным коронным разрядом. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2003. т.5. №1. с.32-36.+

Приведены результаты регистрации распределения потенциала на поверхности односторонне фольгированной диэлектрической пленки в поле отрицательной короны постоянного напряжения при изменении ширины разрядного промежутка. С помощью методов **электрографической визуализации зарядовых рельефов** и зондовых измерений показано, что с увеличением высоты игольчатого коротрона наблюдается возрастание потенциала на периферии зарядового пятна. При этом в средней части радиуса зарядового пятна происходит снижение градиента потенциала на подложке. Полученные результаты способствуют развитию физической модели зарядовых рельефов, играющих определяющую роль в стабилизации газоразрядных процессов униполярной барьерной короны.



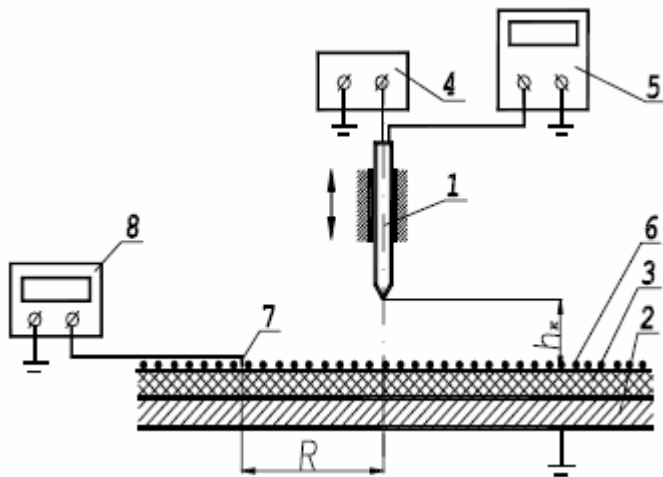


Рис. 3-1-3. Схема экспериментальной установки: 1-коронирующий электрод-игла, 2-металлический экран, 3-диэлектрик, 4-высоковольтный блок питания, 5-электростатический вольтметр С-197, 6-монослой электрографического порошка, 7-контактный зонд, 8-электростатический вольтметр С-95/8 или С-95/3.

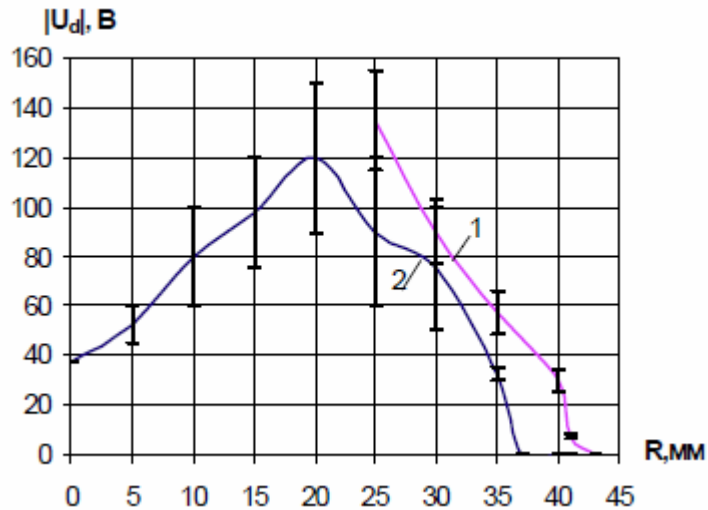


Рис. 3-1-4. Изменение потенциала  $U_d$  на поверхности диэлектрика в зависимости от расстояния  $R$  до оси разряда: 1-при включенном коротроне ( $U_k = -8$  кВ), 2-после снятия напряжения с коротрона.

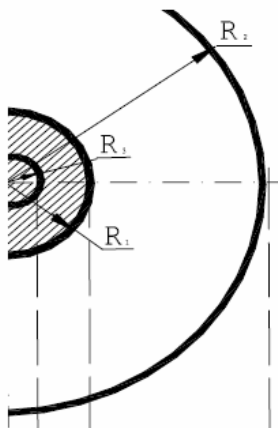


Рис. 3-1-5. Характерные границы электрографических структур на поверхности диэлектрика:  $R_1 = 15-20$  мм-радиус кольцевой структуры сформированной при  $h_k \leq 0,5$  мм и  $U_k = -8$  кВ,  $R_2 \approx 40$  мм радиус внутренней границы кольцевой структур после подъема коротрона на  $h_k = 3$  мм,  $R_3 = 5-7$  мм-радиус пятна разрядки диэлектрика на коротрон после снятия напряжения.

1998-Журавлев О.А., Федосов А.И., Марков В.П., Ивченко А.В. Формирование стабилизирующих газовый разряд приборьерных слоев в стационарной системе электродов острие-диэлектрическая пленка экран/Деп. в ВИНТИ №865-В98 от 25.03.98.

1998-Журавлев О.А., Кислецов А.В., Кусочек А.П. и др. Применение электрографического метода для исследования газодинамических процессов скользящего разряда. IV всес. конф. Кинетические и газодинамические процессы в неравновесных средах. М., 1988.

1999-Шорин В.П., Журавлев О.А., Федосов А.И. и др. Разработка модели поверхностной волны зарядов затухающего коронного разряда. Известия Самарского научного центра РАН. 1999. №1.

---

### 3.2 Распространение разряда по поверхности кожи.

Если молния попадает напрямую в человека, то через человека проходит большой ток и он погибает. Но иногда основной удар молнии происходит рядом, а в человека попадает небольшой боковой стример. В этом случае человека проходит не очень большой ток и он выживает. Если у человека кожа влажная, покрыта слоем воды (во время дождя), то при ударе молнии разряд распространяется по поверхности кожи, а не проходит через тело. Это объясняется тем, что электрическое сопротивление у поверхностного слоя воды меньше, чем у тела.

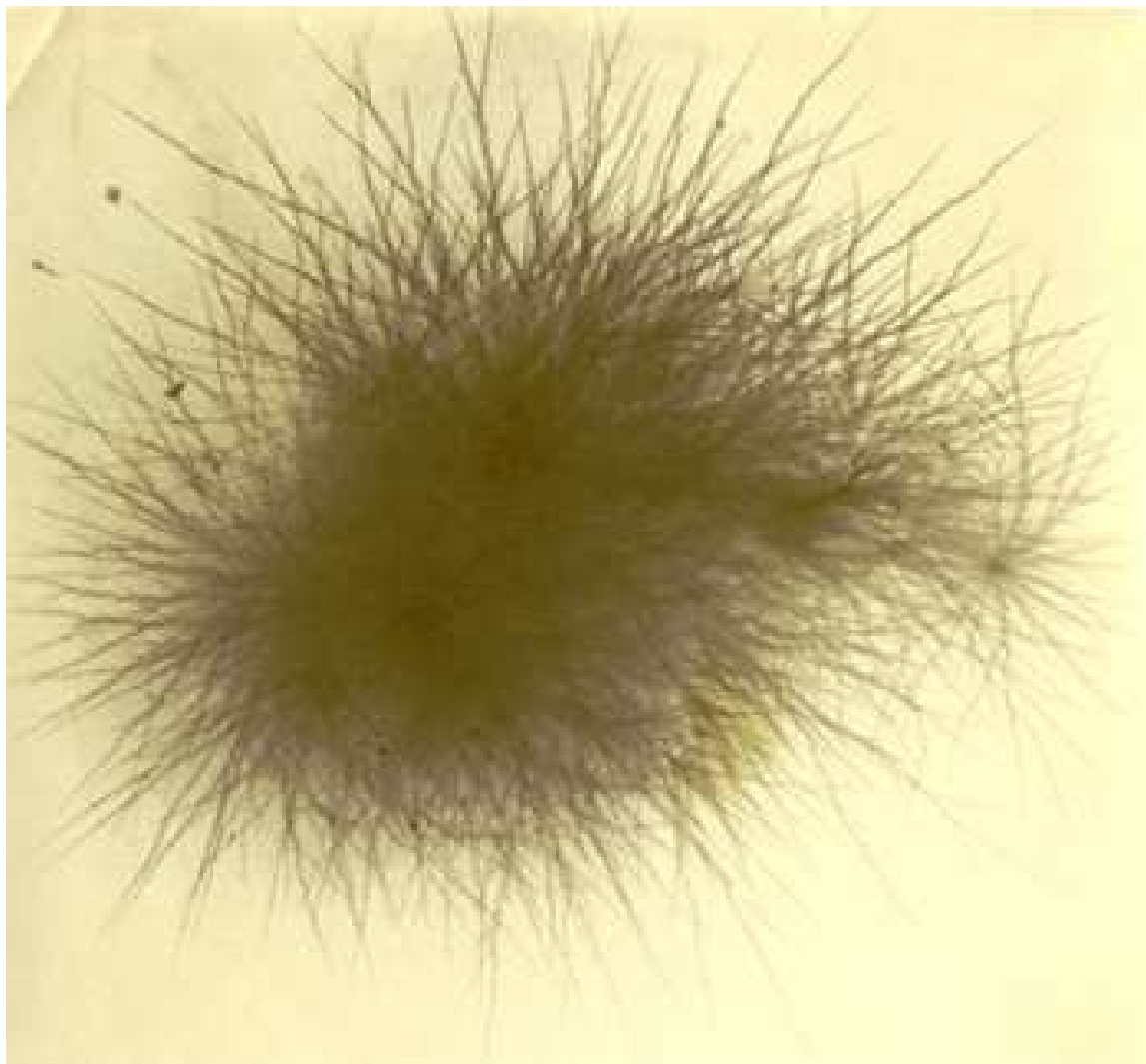


Рис. 3-2-1. Электрофотография, сделанная Наркевичем-Йодко. Название снимка «Вспышка, пойманная на хорошо вымытом теле проститутки». 1882.



Рис. 3-2-2. След на коже после удара молнии.

1794-Parkinson J. Some accounts of the effects of lightning. *Memoirs Med Soc London*. 1794; 2: p.493-507.

1976-Golde RH, Lee WR. Death by lightning. *Proc IEE*. 1976; 123: p.1163-1180.

1987-ten Duis HJ, Klasen HJ, Nijsten MWN. Superficial lightning injuries: their "fractal" shape and origin. *Burns Incl Therm Inj*. 1987; 13: p.141-146.

2003-Michael Cherington, Sheryl Olson and Philip R. Yarnell, "Lightning and Lichtenberg Figures" *Injury: International Journal of the Care of the Injured*, Volume 34, Issue 5, May 2003, P.367-371.

2004-Cherington M. James Parkinson: links to Charcot, Lichtenberg, and lightning. *Arch Neurol*. 2004; 61: p.977.

2007-Michael Cherington, Gilbert McDonough, Sheryl Olson, Rick Russon, Phillip R. Yarnell. Lichtenberg Figures and Lightning: Case Reports and Review of the Literature. 2007. vol.80. p.141-143.+

### 3.3 Распространение разряда по поверхности Земли.

Для образования следа от удара молнии на поверхности земли необходимо выполнение некоторых условий:

- поверхность земли мокрая (например, шел дождь),
- необходимо, чтобы подповерхностный слой был сухой, чтобы разряд не ушел вглубь. (например, подповерхностный слой глинистый, и туда влага не проникла),
- необходимо, чтобы молния была достаточно мощной, чтобы при разряде был большой ток.

Из внешнего вида фигуры разряда видно, что отрицательный заряд из молнии растекался в разные стороны. Наличие в воде на поверхности земли солей способствует увеличению электропроводности воды, и соответственно увеличению размеров образовавшейся фигуры.

При ударе молнии в Землю искровые каналы вдоль ее поверхности могут распространяться на 100м и более.



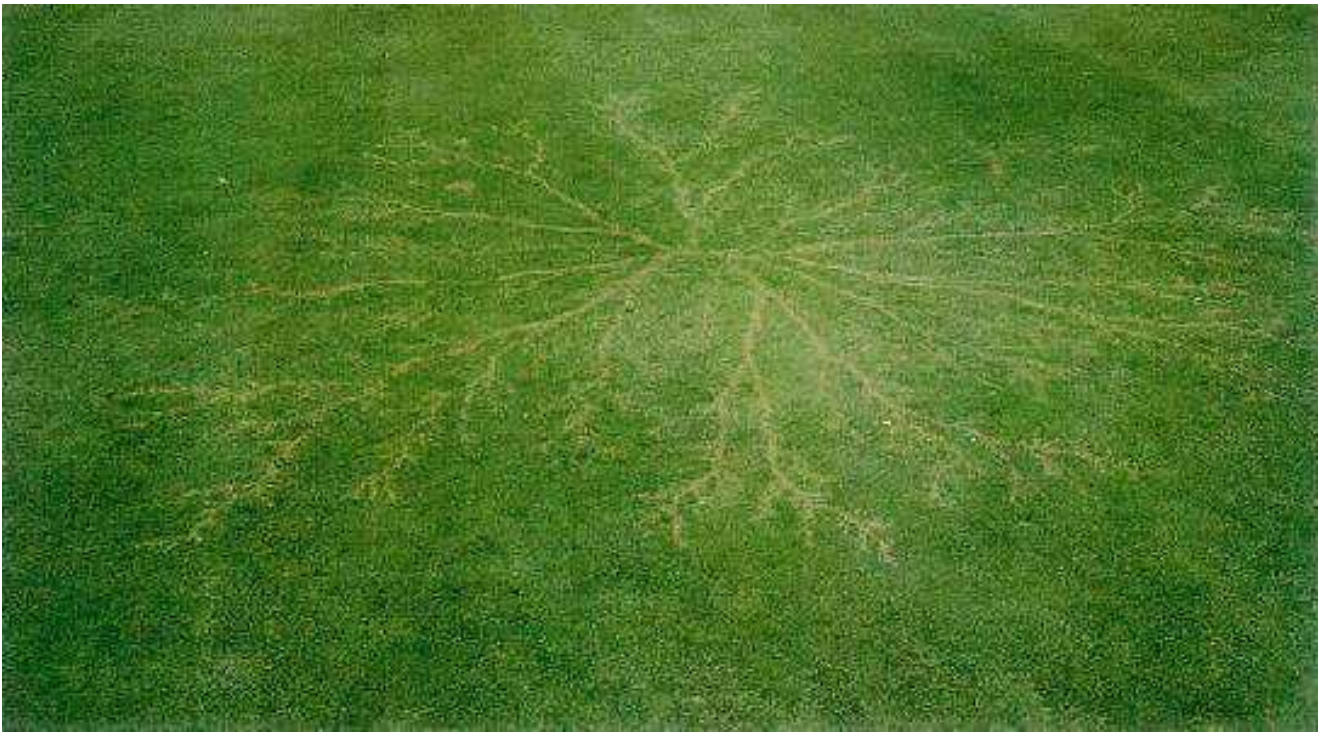


Рис. 3-3-1. Распространение разряда по поверхности влажной Земли.

---

### 3.4 Распространение разряда по различным поверхностям.

Рассматривается разряд между тонким электродом, расположенным на некотором расстоянии от плоского электрода, покрытого слоем воды. Заряд распространяется вертикально вниз к плоскости электрода, а затем распространяется вдоль плоскости.

Figure 1 from Tetsuji Shimizu et al  
2011 New J. Phys. 13 053025

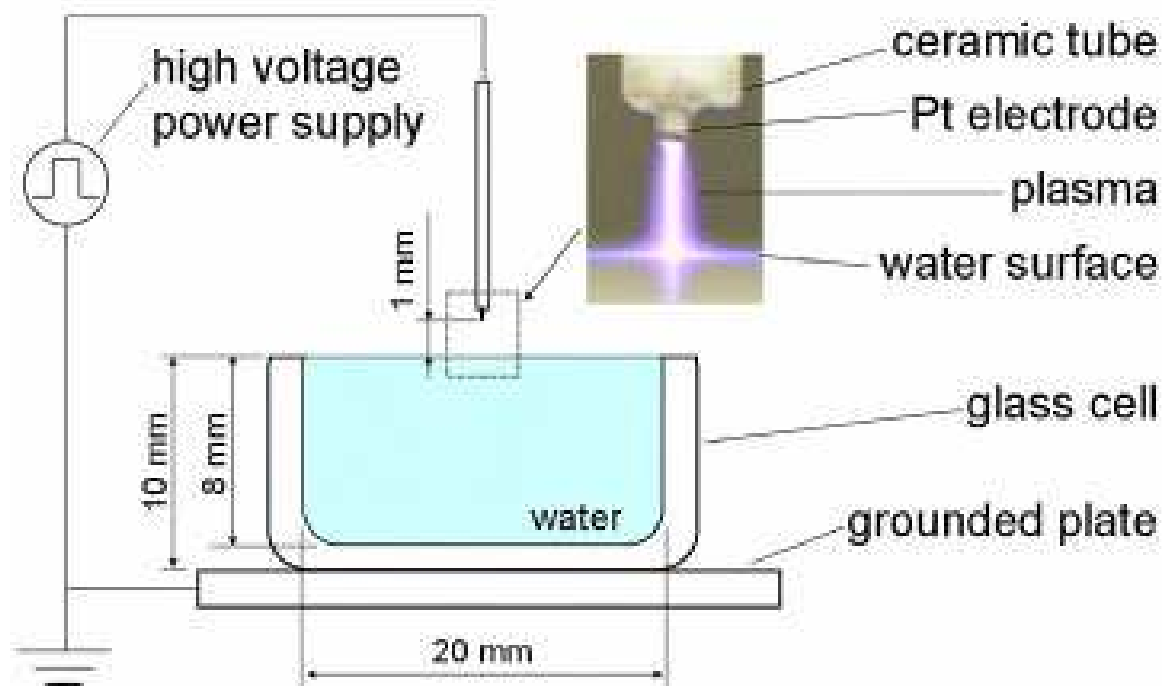


Рис. 3-4-1. Распространение разряда по поверхности воды.

2011-Tetsuji Shimizu, Yutaka Iwafuchi, Gregor E Morfill and Takehiko Sato. Formation of thermal flow fields and chemical transport in air and water by atmospheric plasma. New Journal of Physics. Volume 13. May. 2011.



Рис. 3-4-2. Распространение разряда по поверхности ткани, смоченной водой.

**1989-Марголин Аркадий Давидович** (Москва, Институт химической физики РАН).

**Шмелев Владимир Михайлович**

1989-Марголин А.Д. Евтюхин Н.В. Савельев А.В. Шмелев В.М. Ползуций пробой на поверхности полимера. Доклады АН СССР. 1989. т.307. №6. с.1370-1372.+

1994-Дворкович А.В. Евтюхин Н.В. Марголин А.Д. Шмелев В.М. Фрактальные режимы электрогорения тонких полимерных слоев. Хим. Физика. 1994. т.13. №6. с.111.

1997-Марголин А.Д. Медленный электрический пробой вдоль поверхности полимерных диэлектриков. Сорский образовательный журнал. 1997. №4. с.79-82.+

На увлажненной электролитом поверхности полимера, находящегося между электродами, через некоторое время после включения высокого напряжения (обычно через несколько минут) появляются и растут черные углеродистые дендриты, похожие на искровые снимки электрических разрядов. Стволы и ветви углеродистых дендритов проводят ток подобно каналу молнии или электроискры. Как образуются дендриты. При протекании тока выделяется тепло и электролит испаряется. У электрода образуется сухая полоска с малой электропроводностью. Здесь появляется высокая напряженность электрического поля. Возникает пробой (искра). Искра выжигает полимер, появляется узкий углеродный след, движущийся вслед за лидером-искрой. Через некоторое время искра пропадает. Но потом искра возникает в другом месте. Постепенно из коротких следов образуется дендрит. Происходит термоокислительная карбонизация полимера. В атмосфере инертного газа (азота или аргона) при тех же условиях образования дендритов не происходит.

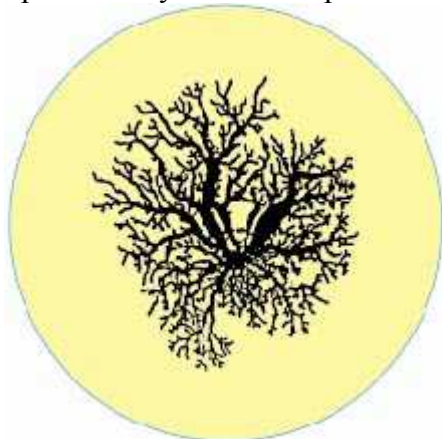


Рис. 3-4-3. Углеродистые дендриты на поверхности полимера между концентрическими электродами.

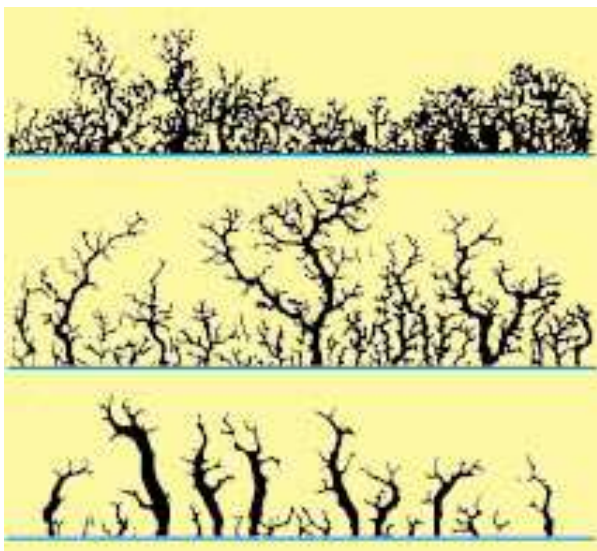


Рис. 3-4-4. Углеродистые дендриты на поверхности полимера между линейными параллельными электродами.

2003-Шмелев В.М., Марголин Л.Д. Распространение электрического разряда по поверхности воды и полупроводника. Теплофизика высоких температур. 2003. т.41. №4. с.831.

2005-Шмелев В.М., Анпилов А.М., Бархударов Э.М. Поверхностный разряд внутри воздушной каверны в воде. Прикладная физика №5. 2005. с.55.

2005-Шмелев В.М., Марголин Л.Д. Распространение электрического разряда по поверхности воды и полупроводника. 2005.+

Разряд на поверхности водонаполненного полимера. Между электродами помещался стеклянный сосуд с водой или пористый полимер (фильтровальная бумага, мелкопористый поролон), насыщенный водой. Один из металлических электродов был плоским и имел непосредственный контакт с водой или влажной поверхностью, другой, заостренный, размещался на расстоянии  $d \sim 1$  мм над образцом. В зависимости от величины напряжения  $U_0$ , длины образца  $L$ , разрядного зазора  $d$  и электрических свойств воды наблюдались различные режимы распространения разряда.

В экспериментах с водой максимальная длина промежутка (расстояние между электродами)  $L_m$ , на который распространялся разряд, превосходила предельное пробойное расстояние  $d^*$  в 3-4 раза. Разряд выглядел как длинная синяя искра, распространяющаяся от острия к плоскому электроду и прижимающаяся к водной поверхности. Аналогичная картина наблюдалась в экспериментах с полосками полимера различной длины. Было установлено существование нескольких режимов протекания разряда. При  $d > d^*$  электрический пробой невозможен, разряд в области I отсутствует. При длине полоски более 40 мм (область II) развивался слабый искровой разряд в воздушном промежутке между заостренным электродом и торцом полоски. При этом электропроводящая полоска играла роль разрядного сопротивления, ограничивающего ток искры. В области III при  $L < L_m$  развивался полноценный поверхностный искровой разряд в виде одного изгибающегося токового канала яркого свечения. При увеличении величины воздушного промежутка  $d$  вблизи предельной длины разряда  $L_m$  поверхностный разряд принимал форму незавершенного (область IV), т.е. светящийся канал разряда обрывался, не достигая плоского электрода. При этом яркость свечения канала резко падала и было возможным появление множественных токовых ответвлений. Заметное влияние на предельную длину разряда оказывало индуктивное сопротивление цепи.

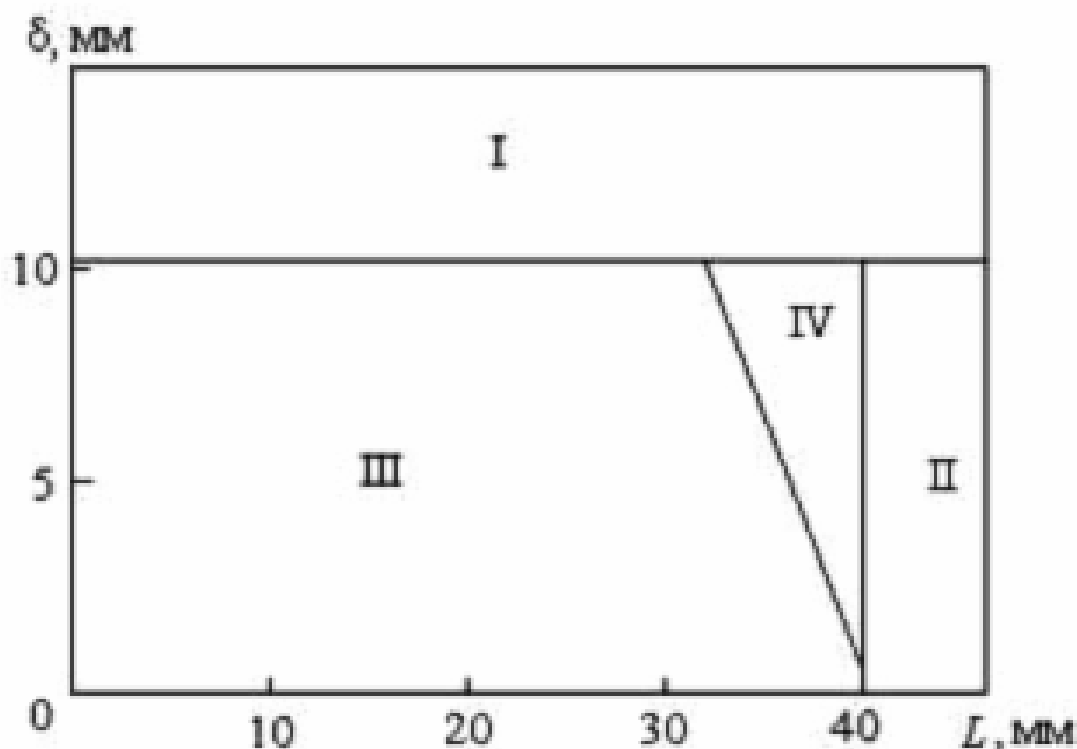


Рис. 3-4-5. Области различных режимов разряда при напряжении на электродах 10кВ. (При регистрации эффекта Кирлиан реализуется режим II,  $d=0$ ,  $L=50$ мм).



**Взрывающаяся струйка воды.** Исследовалось распространение разряда по поверхности тонкой струйки воды. Тонкая струя водопроводной воды под небольшим избыточным давлением непрерывно поступала в прозрачный стакан через металлический капилляр с диаметром канала 0.4мм, являющийся одним из электродов. Другой электрод располагался ниже по длине струи. Между струей и этим электродом был воздушный промежуток  $d=1-5\text{мм}$ . К электродам подключался конденсатор, соединенный через балластное сопротивление с высоковольтным источником питания. Заряд и разряд конденсатора осуществлялись в автоциклическом режиме. При увеличении напряжения на конденсаторе до критического происходил пробой воздушного промежутка и вдоль струйки распространялся поверхностный разряд. Энергия разряда в импульсе при напряжении  $U_0=10\text{кВ}$  варьировалась в пределах от 0.1 до 1Дж. Поверхностный разряд сопровождался сильным УФ излучением, и при этом возникала ударная волна, которая разрывала струйку на мельчайшие капли. Это явление электрического взрыва водной струйки аналогично эффекту “взрывающейся металлической проволоочки”, хотя здесь реализуется другой механизм формирования токового канала. По мере формирования новой струйки, достигающей пробойного промежутка у второго электрода, возникал следующий разряд т.д. Время распространения разряда было порядка 10мкс, время заряда конденсатора-порядка 1 мсек. Изменения в широких пределах электропроводности воды или скорости истечения струи практически не изменяли максимальной длины поверхностного разряда, которая в условиях данного эксперимента при  $U_0=10\text{кВ}$  и ширине воздушного промежутка у второго электрода  $d=5\text{мм}$  составляла примерно 35мм.

---

### 3.5 Распространение разряда между двумя точечными электродами по поверхности.



Рис. 3-5-1. Распространение разряда между двумя электродами по поверхности деревянной доски, смоченной раствором соды. Два снимка сделаны с интервалом в 10 секунд.



Рис. 3-5-2. Распространение разряда по деоветной поверхности.

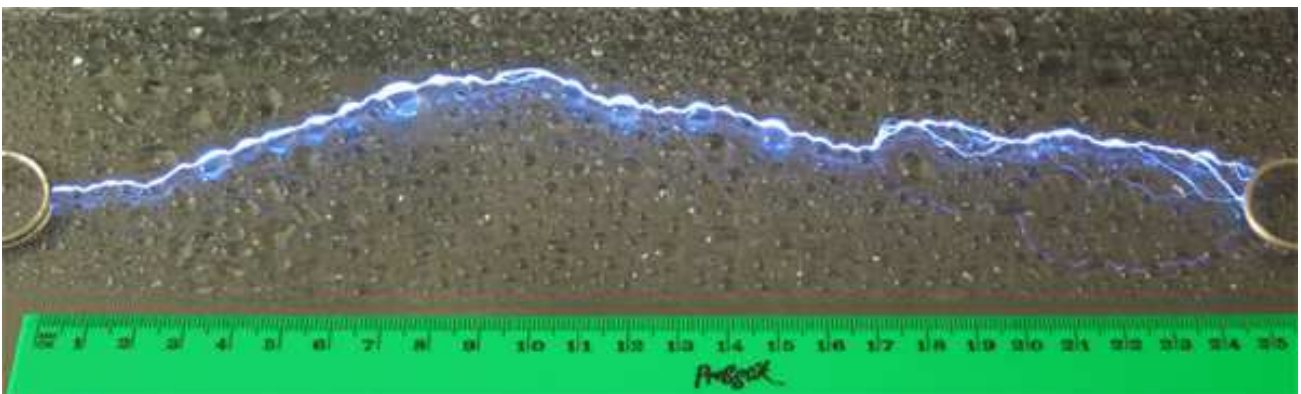


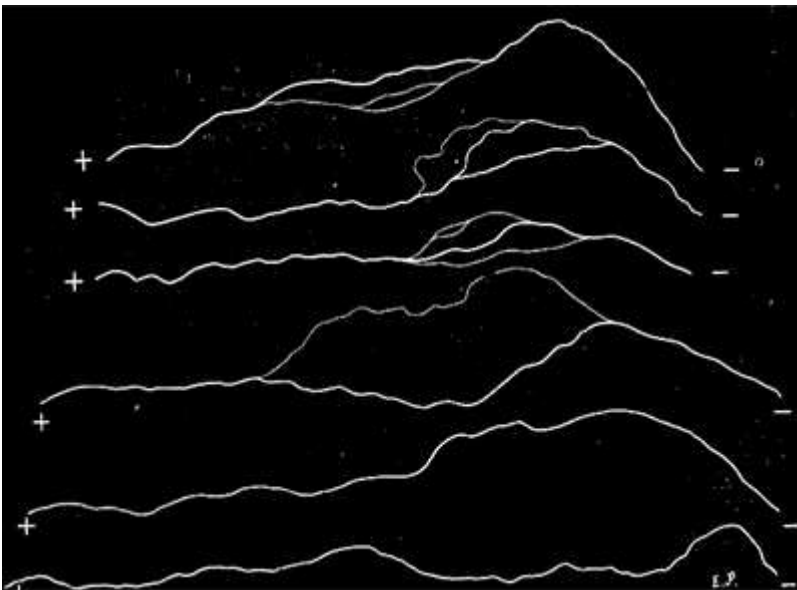
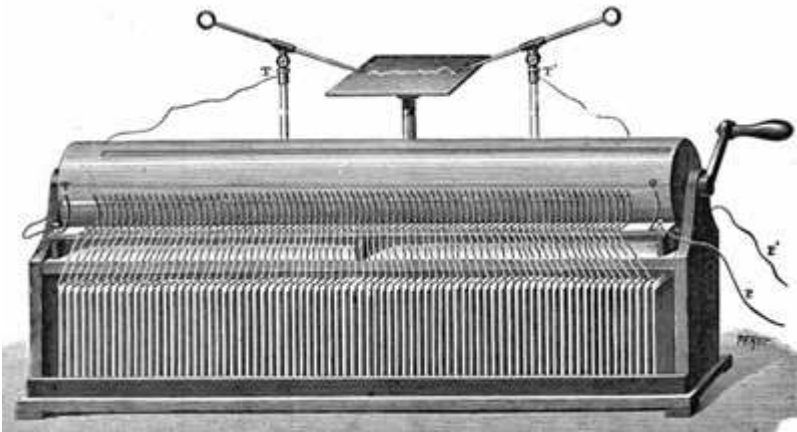
Рис. 3-5-3. Распространение разряда по влажной поверхности.

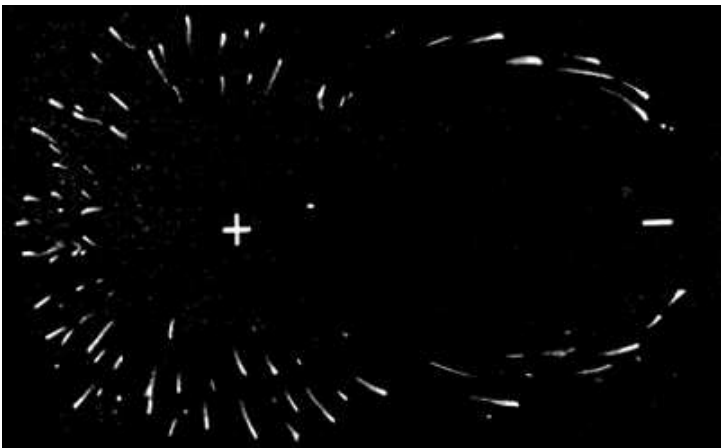
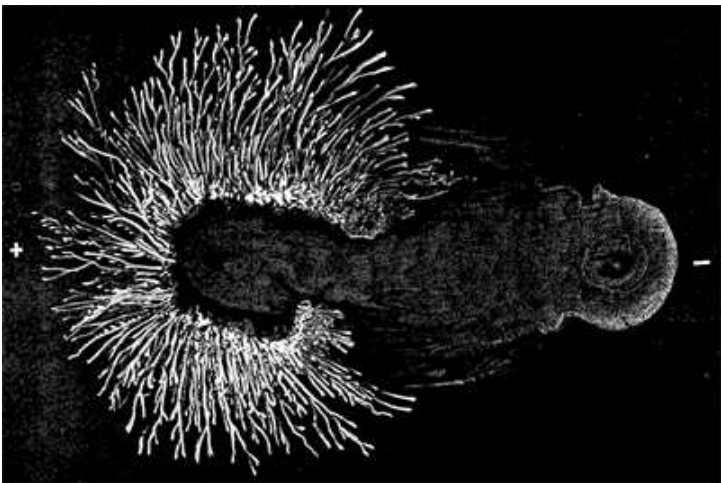
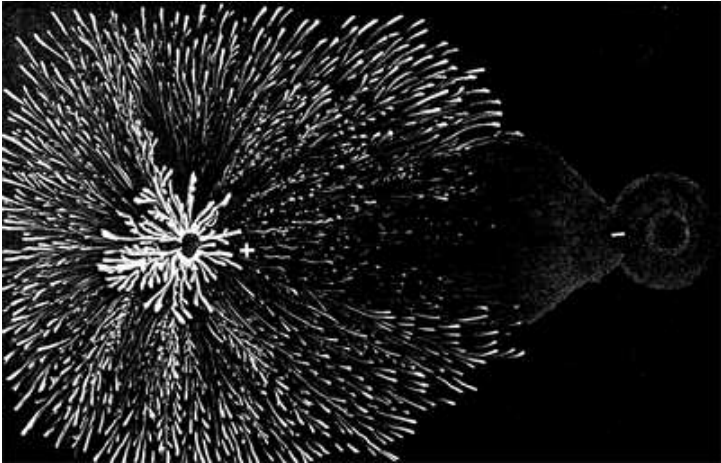
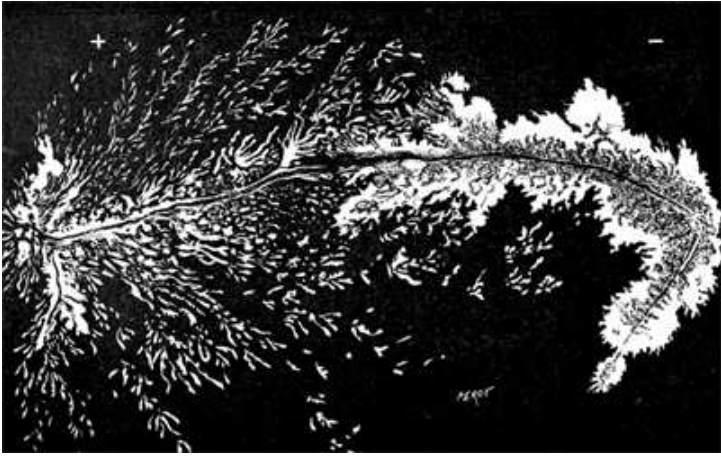
---



Рис. 3-5-4. Скользящий разряд по поверхности диэлектрика положительного (слева) и отрицательного (справа) знака.

Perot. Plante-Rheostatic Machine and Lichtenberg Figures.





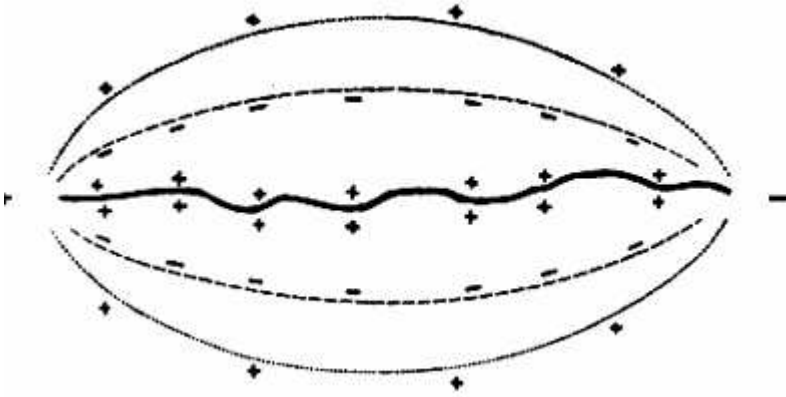


Рис. 3-5-5. Схема реостатной установки и зарегистрированные разряды. Визуализация разрядов производилась с помощью порошков серы и свинцового сурика.

---



Рис. 3-5-6. Разрушение поверхности CD диска в микроволновой печи.

---

### 3.6 Литература по скользящему барьерному разряду.

- Акишин А.И. Скользящий разряд по поверхности полимерных материалов в вакууме. ФХОМ, 2003, №5, с.28-31.
- Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Косый И.А., Малых Н.И. (Москва, ИОФ) Микроволновое и лазерное зондирование искрового разряда скользящего по поверхности воды. Конф. 2009.+
- Баженов О.А., Вихарев А.В. Разряд по поверхности твердых диэлектриков: методические указания. Иваново: ИГЭУ, 2009. 20с.
- Бакшин В.К., Кузьмин Г.П., Минаев И.М., Рухадзе А.А., Тимофеев Н.Б. Особенности скользящего разряда по границе раздела диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью. Прикладная физика. 2005. №6. с.54-59.
- Блощицын Владимир. Обзор экспериментальных работ по поверхностному разряду. 2008.+ <http://v-bloshchitsyn.narod.ru>
- Калинин А.В., Козлов М.В., Панюшкин В.В. Известия Академии наук. Энергетика. №4. Москва, 1993, с.45-51.
- Colas, Dorian F.; Ferret, Antoine; Pai, David Z.; Lacoste, Deanna A.; Laux, Christophe O. Ionic wind generation by a wire-cylinder-plate corona discharge in air at atmospheric pressure. Journal of Applied Physics; Nov. 2010, Vol. 108 Issue 10, p.103306.
- Marx E.**, Archiv fur Elektrotechnik. 1928. 20. p.589.
- Marx E., Der Durchschlag der Luft im unhomogenen elektrischen Feld bei verschiedenen Spannungsarten, Elektrotech. Zs., 1930. 51. p.1161.
- Masuda S. Industrial Applications of Electrostatics. Journal of Electrostatics.1981. V.10. P.1-14.
- Rosenlocher P. Archiv fur Elektrotechnik. 1932. 26. p.19. Исследовали разряд, когда фотопластинка располагалась перпендикулярно к плоскому электроду, а острие лежало не ее поверхности.
- Wenqin Li, Xiaoqiong Wen, Jialiang Zhang. Photographic Study on Spark Discharge Generated by a Nanosecond High-Voltage Pulse over a Water Surface. Plasma Science and Technology.10/2013. 15(10): p.1020-1024.
-

## Глава 4. Применение холодной плазмы газового разряда для дезинфекции.

### 4.1 Воздействие холодной плазмы на кожу.

Холодная плазма, возникающая при высокочастотном барьерном разряде при атмосферном давлении может быть использована для обеззараживания поверхности кожи, при этом не происходит теплового разрушения клеток. Низкотемпературная плазма (НТП) представляет большой научный и практический интерес вследствие ее сильной термодинамической неравновесности. Наличие в НТП энергичных электронов приводит к интенсивным процессам образования химически и биологически активных частиц в окружающем газе, остающемся при комнатной температуре. Отмеченное обстоятельство делает НТП весьма привлекательным, технически несложным, энергетически дешевым и экологически безопасным инструментом для холодной стерилизации различных микроорганизмов на поверхностях, в газах и в жидкостях.

---

**Акишев Ю.С. д.ф.м.н., ТРИНИТИ, Троицк.**

2004-Ю.С.Акишев, Г.И.Апонин, В.Б.Каральник, А.Е.Монич, Н.И.Трушкин. Физика плазмы, 2004, том 30, №9, с.835-844.

2004-Ю.С.Акишев, Г.И.Апонин, В.Б.Каральник, А.Е.Монич, Н.И.Трушкин. Физика плазмы, 2004, том 30, №11, с.1044-1056.

2006-Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Трушкин Н.И., Холоденко В.П., Чугунов В.А., Жиркова Н.А., Ирхина И.А., Кобзев Е.Н. (ТРИНИТИ, Троицк) Применение неравновесной низкотемпературной плазмы атмосферного давления для стерилизации бактерий. Альманах клинической медицины. 2006. №12. с.101-

---

2011-D. Dobrynin, A. Wu, S. Kalghatgi, S. Park, N. Shainsky, K. Wasko, G. Fridman, A. Brooks, G. Friedman, A. Fridman. Live Pig Tissue and Wound Toxicity of Cold Plasma Treatment, Plasma Medicine, 2011, 1(1): p.93-108.

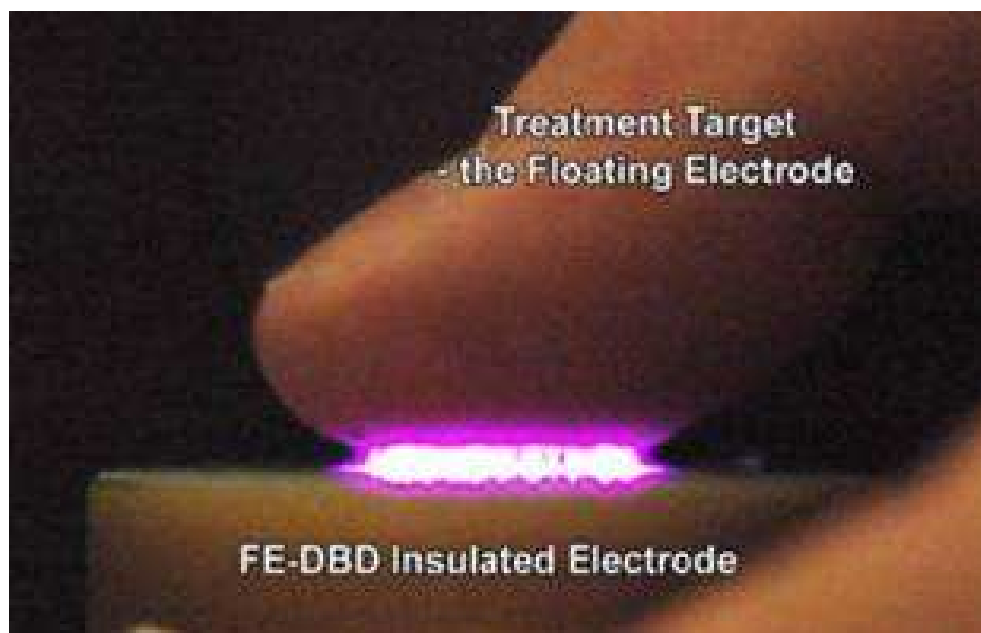


Рис. 4-1-1. Воздействие холодной плазмы на кожу.

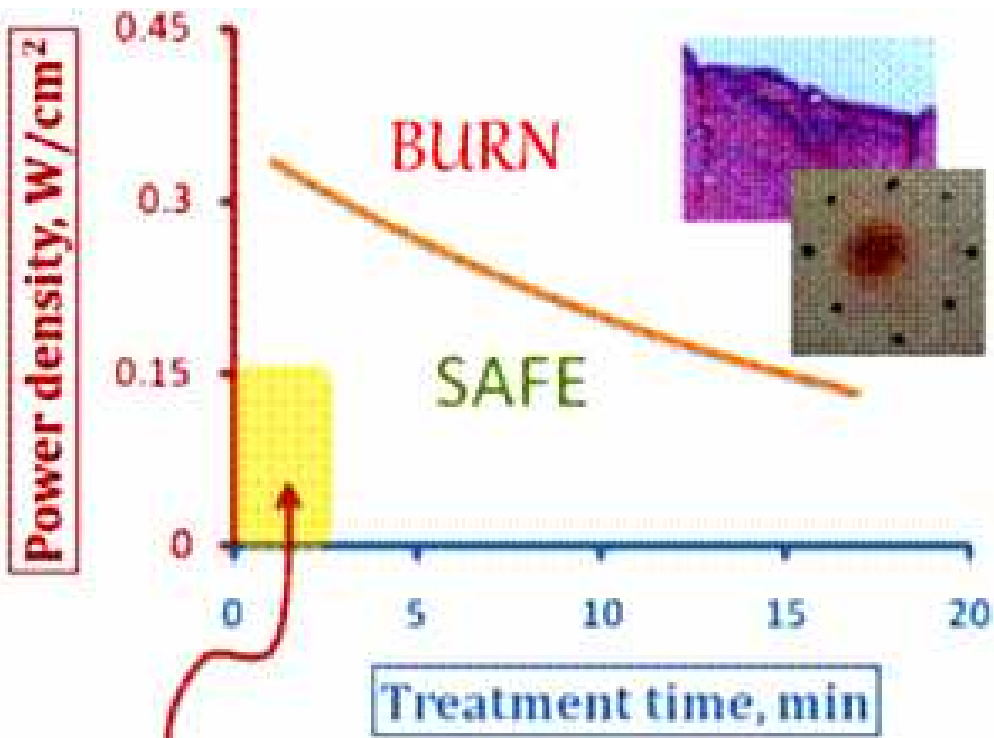


Рис. 4-1-2. Зависимость мощности от времени воздействия, при котором происходит разрушение ткани.

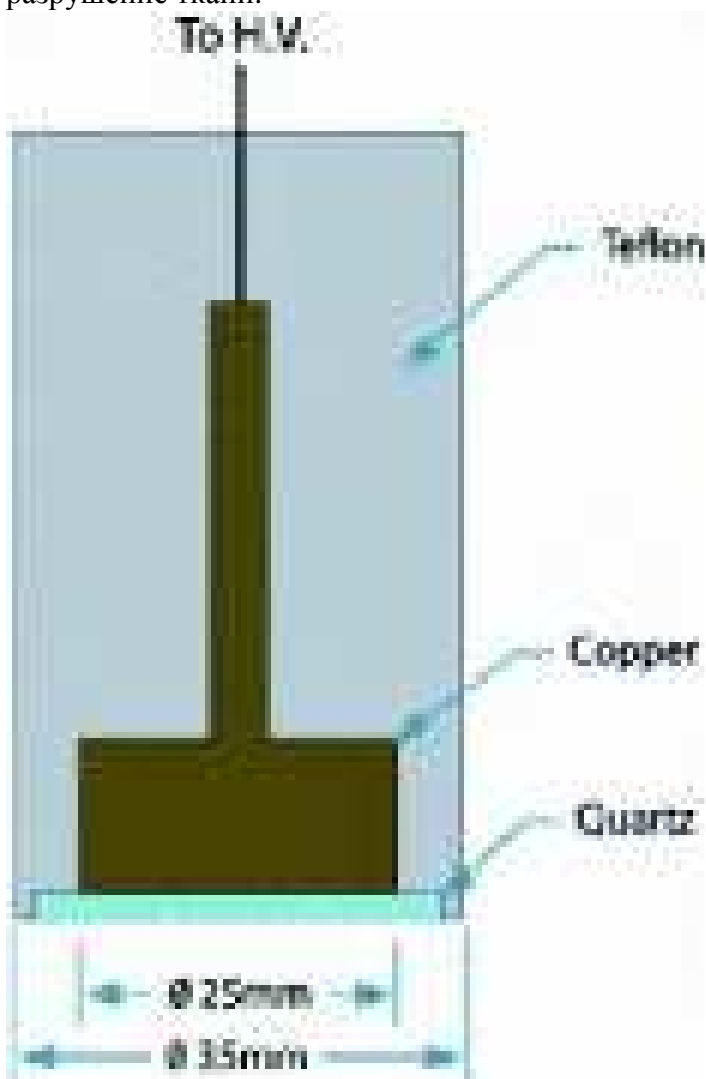
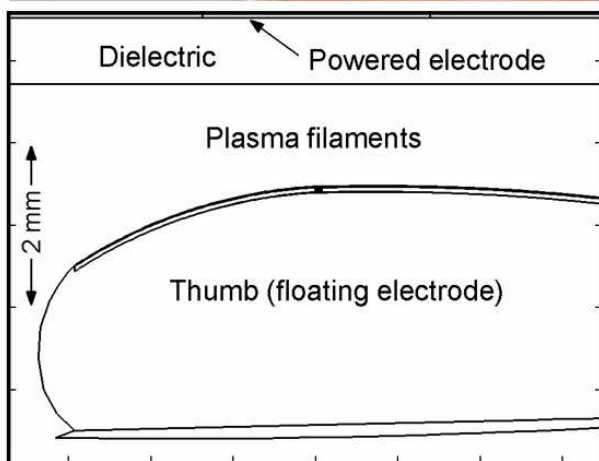
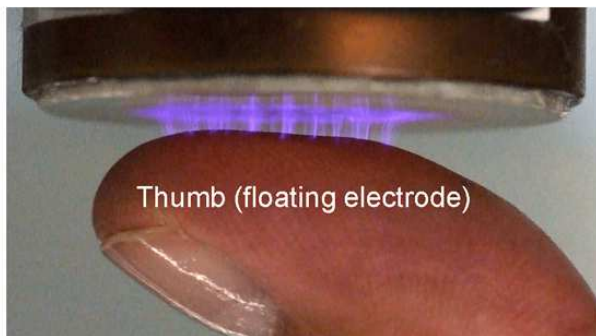


Рис. 4-1-3. Конструкция электрода для воздействия на кожу холодной плазмой.





(a)

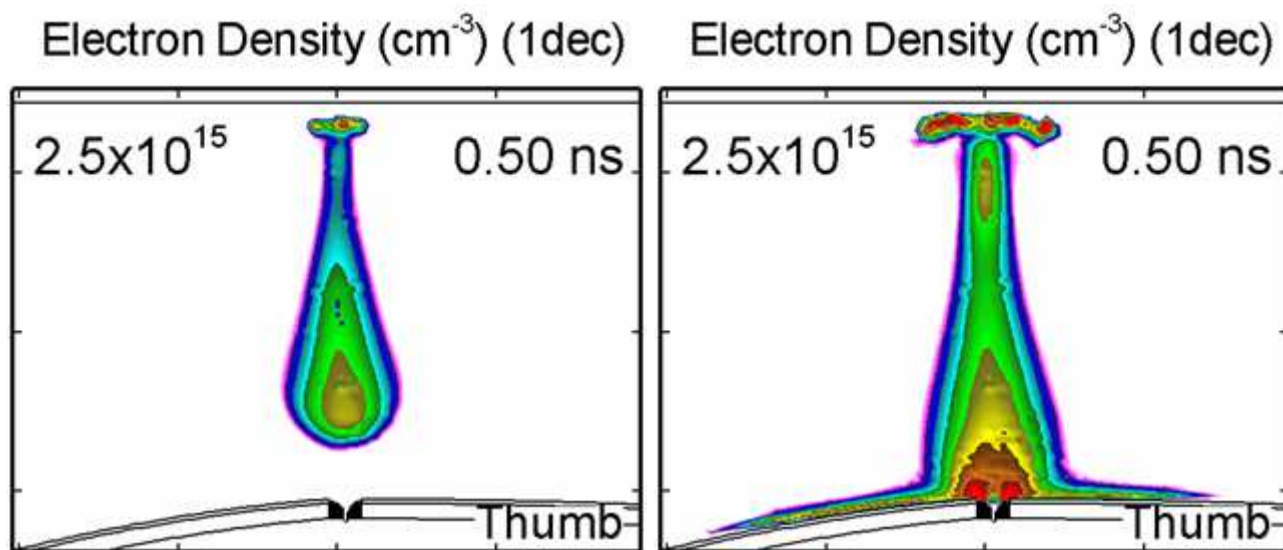


Рис. 4-1-4. Структура барьерного разряда.

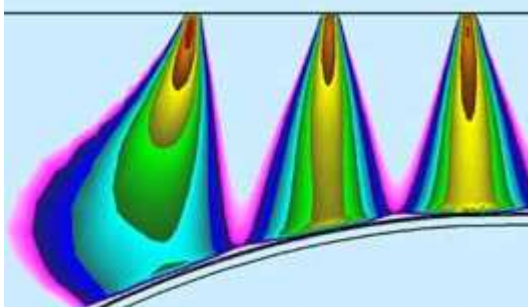


Рис. 4-1-5. Распределение плотности электронов.

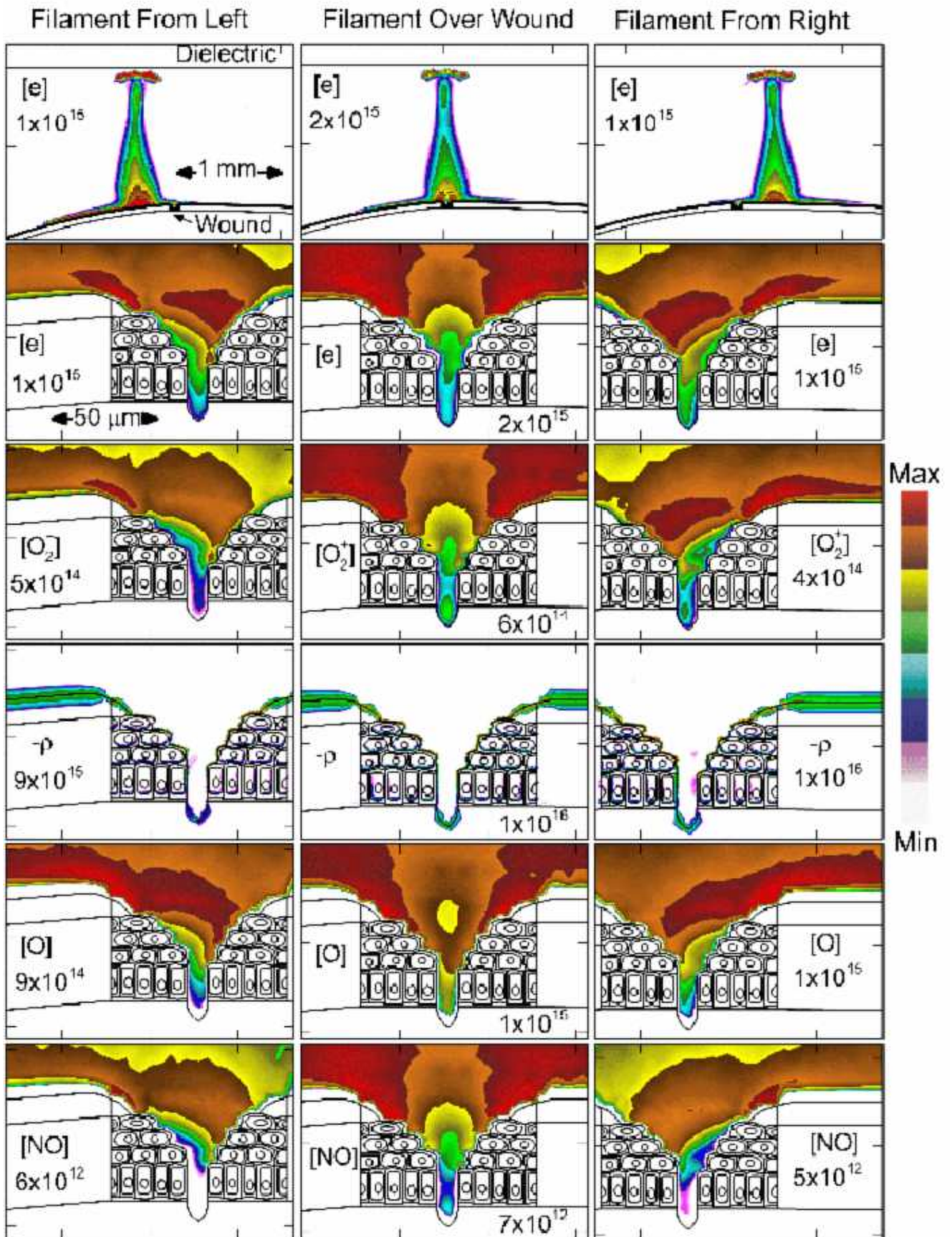


Рис. 4-1-6. Взаимодействие разряда с порой на поверхности кожи.  
 2010-N. Yu. Babaeva and Mark J. Kushner, "Intracellular electric fields produced by dielectric barrier discharge treatment of skin", J. Phys. D 43, 185206 (2010).

#### 4.2 Литература по применению холодной плазмы в медицине.



Рис. 4-2-1. Алейник А.Н. Плазменная медицина. Учебное пособие. 2011.

Стримерные разряды в воздухе используются для очистки газов и производства озона. Обработка полимерных пленок разрядом приводит к улучшению смачиваемости поверхности и позволяет наносить красящие вещества, которые могут удерживаться более надежно. Электрический разряд успешно используется в медицине для быстрой коагуляции крови и уничтожения микроорганизмов. Дальнейший прогресс в области применения электрических разрядов требует большего понимания процессов, происходящих в разряде, с целью осуществления контроля над ним. В учебном пособии «Плазменная медицина» рассмотрены основные понятия плазменной медицины и ее приложения в медицинской практике. Пособие подготовлено на кафедре прикладной физики Физико-технического института Томского политехнического университета и предназначено для студентов и магистрантов, изучающих медицинскую физику.

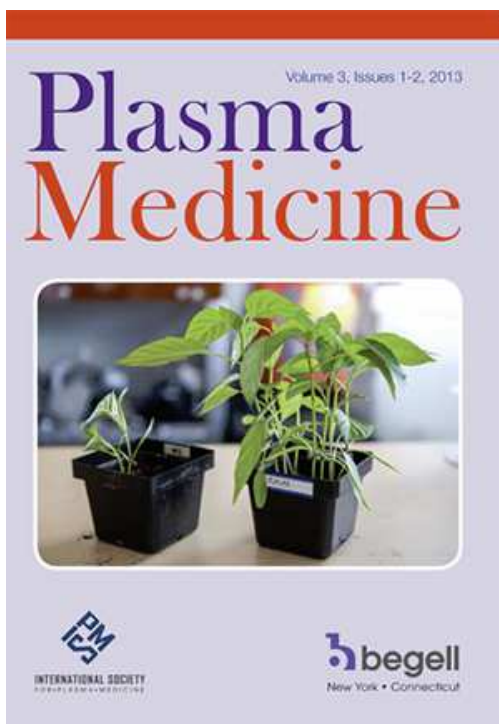


Рис. 4-2-2. Журнал Plasma Medicine. Выходит с 2011 года, 4 выпуска в год.

<http://www.dl.begellhouse.com/journals/5a5b4a3d419387fb,6239f734065d8e3d.html>

2000-J.C. Weaver, *Electroporation of Cells and Tissues*. (Boca Raton, FL: CRC Press and IEEE Press, 2000).

2002-S.J. Beebe, P.M. Fox, L.J. Rec, K. Somers, R.H. Stark, and K.H. Schoenbach, "Nanosecond pulsed electric field (nsPEF) effects on cells and tissues: Apoptosis induction and tumor growth inhibition," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 30, 286 (2002).

2003-Y. Feldman, I. Ermolina, and Y. Hayashi, "Time Domain Dielectric Spectroscopy Study of Biological Systems", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Ins.* 10, 728 (2003).

2005-A. B. Shekhter, V.A. Serezhenkov, T.G. Rudenko, A.V. Pekshev and A.F. Vanin, "Beneficial effect of gaseous nitric oxide on the healing of skin wounds", *Nitric oxide: Biol. Chem.* 12, 210 (2005).

2009-Laroussi M. *Low-Temperature Plasmas for Medicine?* *IEEE Trans. Plasma. Sci.* 2009. Vol.37. p.0093.

2009-M.G. Kong, G. Kroesen, G. Morfill, T. Nosenko, T. Shimizu, J. van Dijk, and J. L. Zimmermann, "Plasma medicine: an introductory review", *New Journal of Physics* 11, 115012 (2009).

-----  
2006-G. Fridman, M. Peddinghaus, H. Ayan, A. Fridman, M. Balasubramanian, A. Gutsol, A. Brooks, and G. Friedman, "Blood coagulation and living tissue sterilization by floating electrode dielectric barrier discharge in air," *Plasma Chem. Plasma Process.*, 26, 425 (2006).

2008-S. Kalghatgi, D. Dobrynin, A. Wu, R. Sensenig, G. Fridman, M. Balasubramanian, A. Brooks, K. Barbee, A. Fridman, G. Friedman. Toxicity Analysis of Dielectric Non-Thermal Plasma Treatment of Living Tissue (Poster Presentation), 35th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), June 15-19 2008, Karlsruhe, Germany.  
-----

## Глава 5. Загибание стримеров, структура стримеров при барьерном разряде.

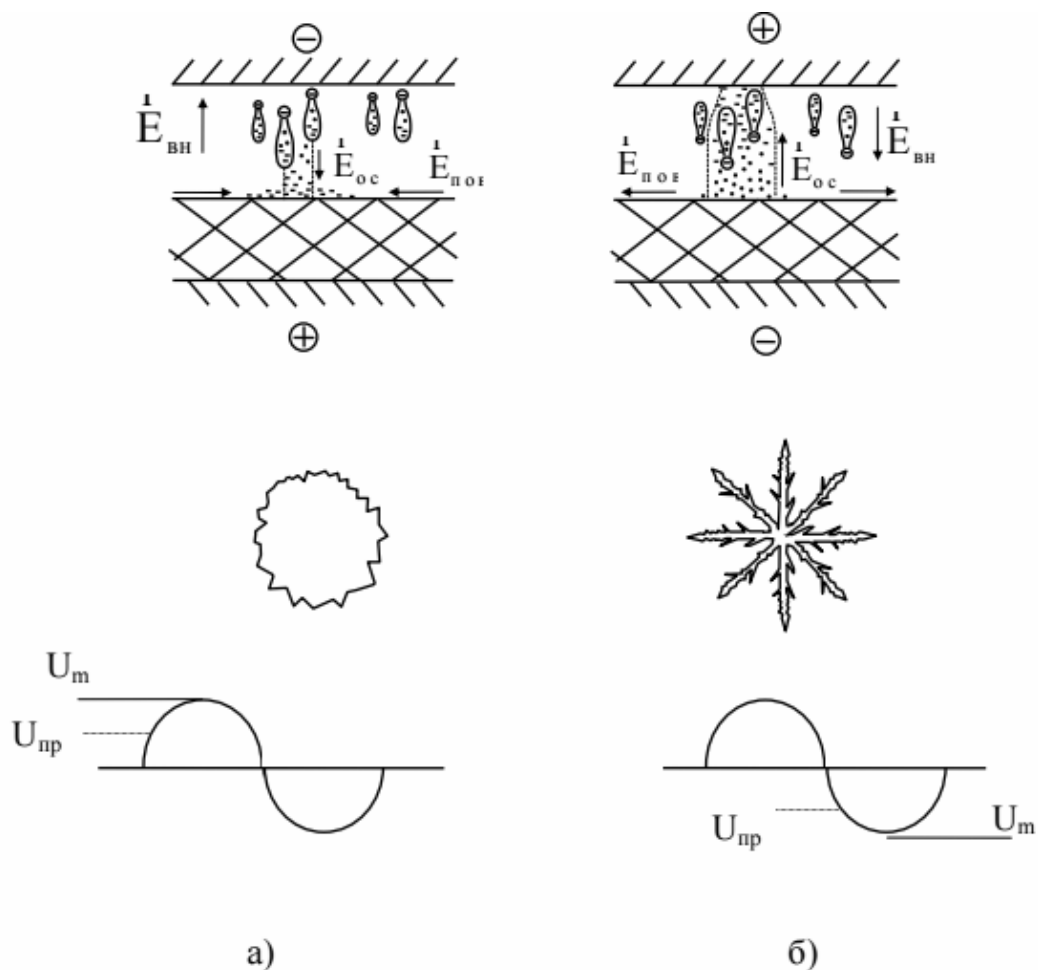


Рис. 5-1-1. Развитие стримера при барьерном разряде.

1-Рассмотрим первый полупериод воздействующего напряжения, электрод с диэлектриком является анодом (а). При повышении напряжения возникает большое число лавин,двигающихся по направлению к диэлектрическому барьеру. при нормальной плотности газа в разрядном промежутке длиной  $l = 1-3\text{мм}$  развитие лавин может привести к созданию объемных зарядов с плотностью  $N$ , при которой выполняется условие перехода лавины в стример ( $N = 10^{18} \text{ 1/см}^3$ ). При выполнении этого условия в каком-то месте промежутка возникает стримерный канал, головка которого доходит до поверхности электрода, покрытого диэлектрическим барьером. Происходит пробой газового промежутка по многолавино-стримерному механизму. Внешне разряд выглядит как искра. Этому процессу соответствует напряжение  $U_{пр}$ .

В ходе образования и движения лавин и, в особенности, при подходе к диэлектрическому барьеру головки стримера, на поверхность барьера оседают отрицательные заряды-электроны. Диаметр канала стримера составляет при рассматриваемых условиях  $0,1\text{мм}$ . Примерно таких же размеров оказывается и пятно заряда, осевшего на барьер. Большое поверхностное сопротивление препятствует растеканию заряда по поверхности. Возникающее поля от осевшего заряда вызывает прекращение разряда. Описанный процесс занимает несколько наносекунд. Одновременно начинается развитие стримера в другой части промежутка, и процесс повторяется. Образование в разных точках искр и их затухание будет продолжаться до тех пор, пока приложенное напряжение не достигнет максимального значения  $U_m$ . После этого разряд в промежутке прекращается.

Что касается положительных ионов, образовавшихся при развитии лавин, то, обладая гораздо меньшей подвижностью, они постепенно смещаются в сторону металлического катода. Подходя к нему, они нейтрализуются.

2-Рассмотрим теперь полупериод, когда электрод с диэлектрическим барьером является катодом. При этом вновь рассматривается самый первый полупериод, при котором развитие разряда в промежутке начинается при отсутствии заряда на диэлектрике. Развитие разряда идет в этом случае в направлении металлического электрода. Вновь образуется стример, но при подходе его головки к аноду все электроны уходят в металл. Накопления заряда на аноде не происходит. Но развитие стримера идет и в сторону катода, к которому перемещаются положительно заряженные ионы. Подходя к барьеру, они оседают на нем, образуя положительный заряд, являющийся причиной возникновения поверхностного разряда. В данном случае поверхностный разряд носит стримерный характер и на поверхности барьера остается пятно в виде звездочки. Диаметр звездочек одиночных разрядов достигает 20-25мм.

3-Иначе обстоит дело, когда разряд развивается в промежутке, в котором на диэлектрическом барьере уже имеется заряд, оставшийся от предыдущего полупериода. Поскольку поверхностное сопротивление материала барьера очень велико, заряд не успевает релаксировать за время одного периода. Распределение зарядов на поверхности к началу разряда в данный полупериод остается практически тем же, как в момент окончания разряда в предыдущий полупериод. Это означает, что в новый полупериод поле осевших зарядов складывается с внешним полем, усиливая его. Поэтому в местах, где расположены пятна или звездочки осевших зарядов, напряженность поля достигает начальной  $E_n$  раньше, чем в остальной части промежутка. Развитие ионизационных процессов и разряд оказываются “привязанными” к местам разряда в предыдущий полупериод.

Если барьер и плоский электрод не соприкасаются, то возникает столб разряда в разрядном промежутке. Его проводимость очень высокая, вследствие чего данный столб разряда можно рассматривать как аналог металлического электрода, соприкасающегося с поверхностью диэлектрического барьера. В области соприкосновения с диэлектрическим барьером на его поверхности возникает расширенная область электрического разряда, называемая приборьерным пятном. Область приборьерного пятна обладает более низкой температурой по сравнению со столбом электрического разряда.

Канал микроуазряда состоит из трех основных частей: столба канала 4 и двух приэлектродных частей 3 и 5, прилегающих соответственно к верхнему металлическому электроду 1 и диэлектрическому барьеру 2. Диаметр приэлектродной части 5 обычно в 2-3 раза превышает диаметр других частей канала микроуазряда.

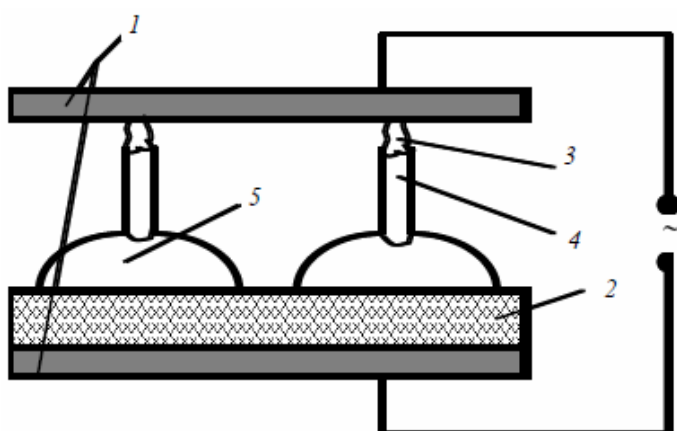


Рис. 5-1-2. Фрагмент барьерной разрядной ячейки и геометрия канала микроуазряда: 1-металлические электроды; 2-диэлектрик (барьер); 3-приэлектродная часть канала металлического микроуазряда; 4-столб канала микроуазряда; 5-прибарьерная расширенная часть канала микроуазряда.



Рис. 5-1-3. Стример состоит из прямолинейного канала, который разветвляется на поверхности диэлектрика.  
-----

### **Канал искрового разряда в малых промежутках.**

-При поверхностном разряде при малом расстоянии между пальцем и электродом возникает искровой канал, обладающий ярким свечением (канал искрового разряда в малых промежутках). Стример соединяет два электрода и возникает ток через канал. Энергия движения электронов передается ионам. Происходит разогрев плазмы и плазма ярко светится.

-Газ, в котором значительная часть атомов и молекул ионизована, называется плазмой.

-При лавинном процессе образуются локальные области с плазмой.

-Плазменный канал состоит из холодной плазмы.

-плазма при низкой температуре имеет малый Дебаевский радиус. Это означает, что плазменный канал обладает устойчивостью. Если происходит нарушение концентрации или формы канала, то возникают большие электрические поля, которые приводят к восстановлению исходного состояния.

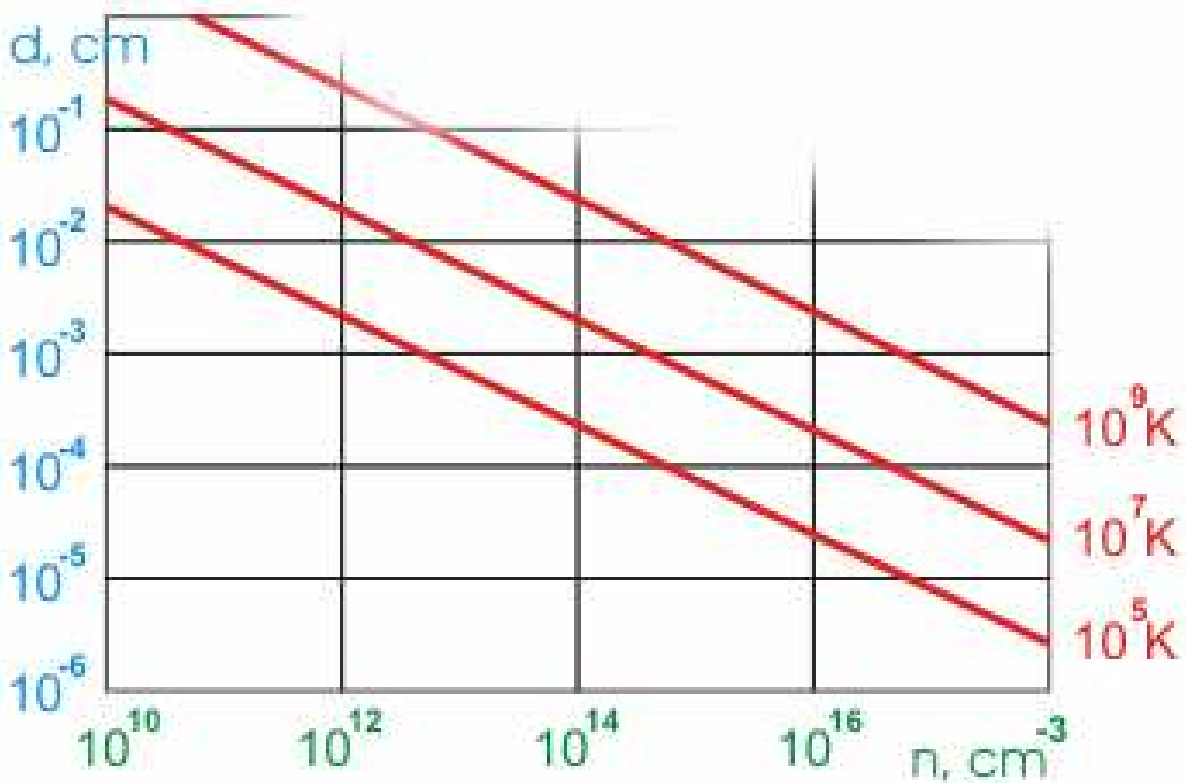


Рис. 5-1-4. Зависимость Дебаевского радиуса от плотности плазмы при разной температуре.

1919-Pedersen Peder Olaf, академия наук Дании, Копенгаген.

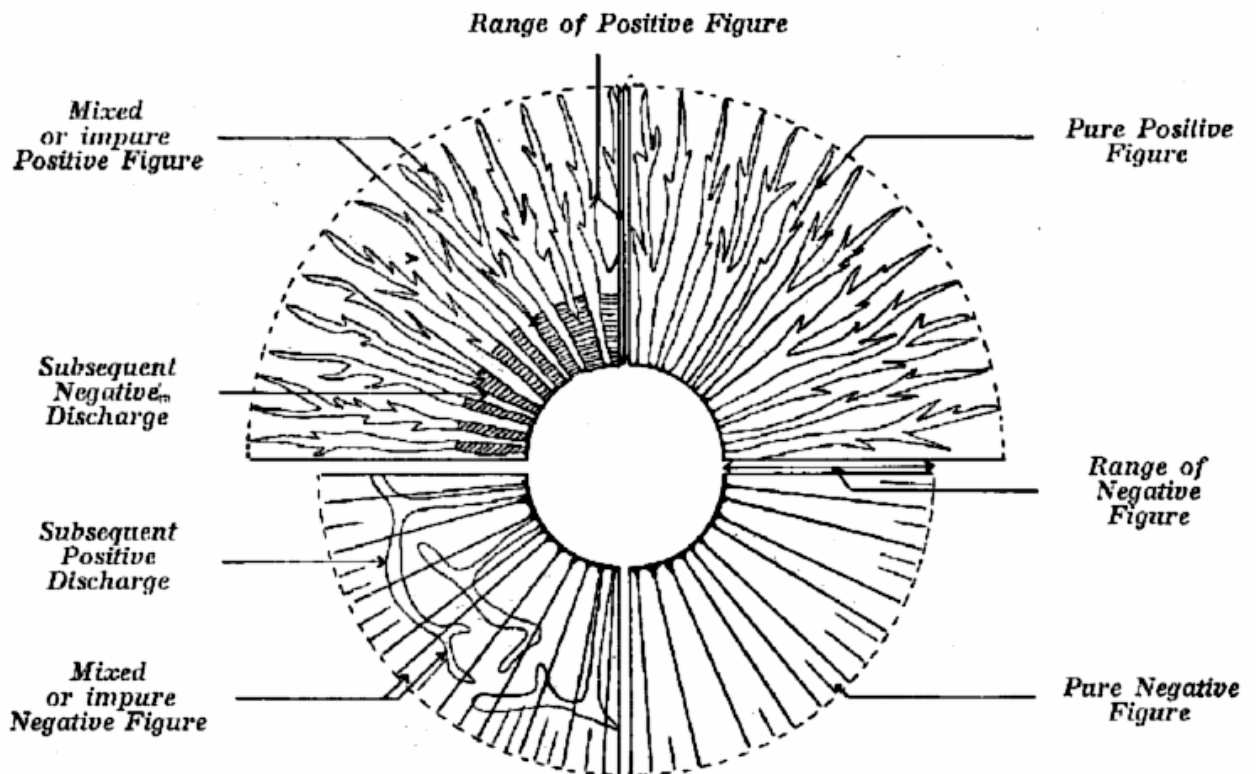


Рис. 5-1-5. Строение положительного разряда (сверху) и отрицательного разряда (снизу).



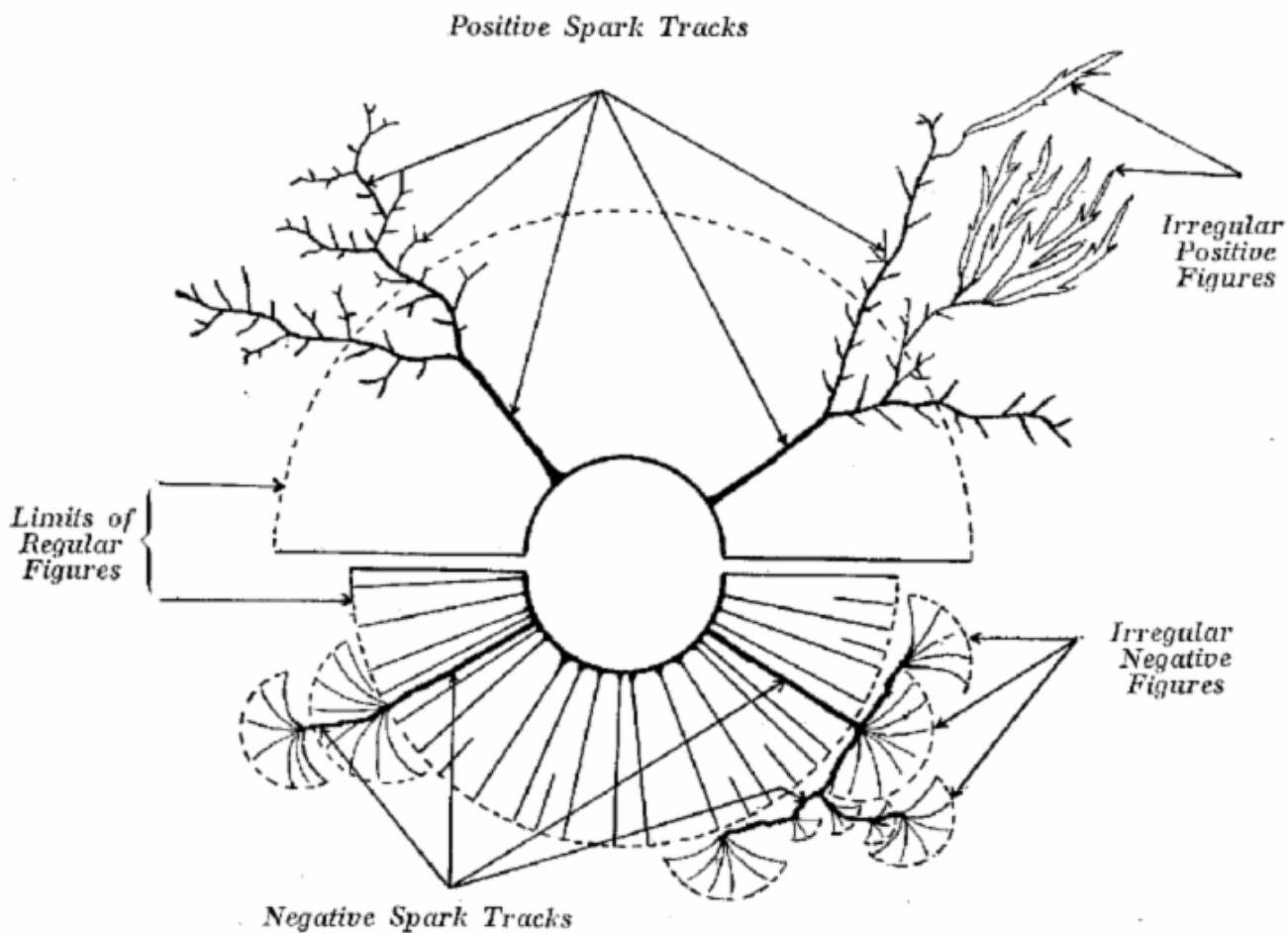


Рис. 5-1-6. Пример строения сложного разряда.

1939-Merrill, F.H. and Artur von Hippel, "The Atomphysical Interpretation of Lichtenberg Figures and Their Application to the Study of Gas Discharge Phenomena," Journal of Applied Physics. 1939. V.10. Issue 12. p.873-887.+

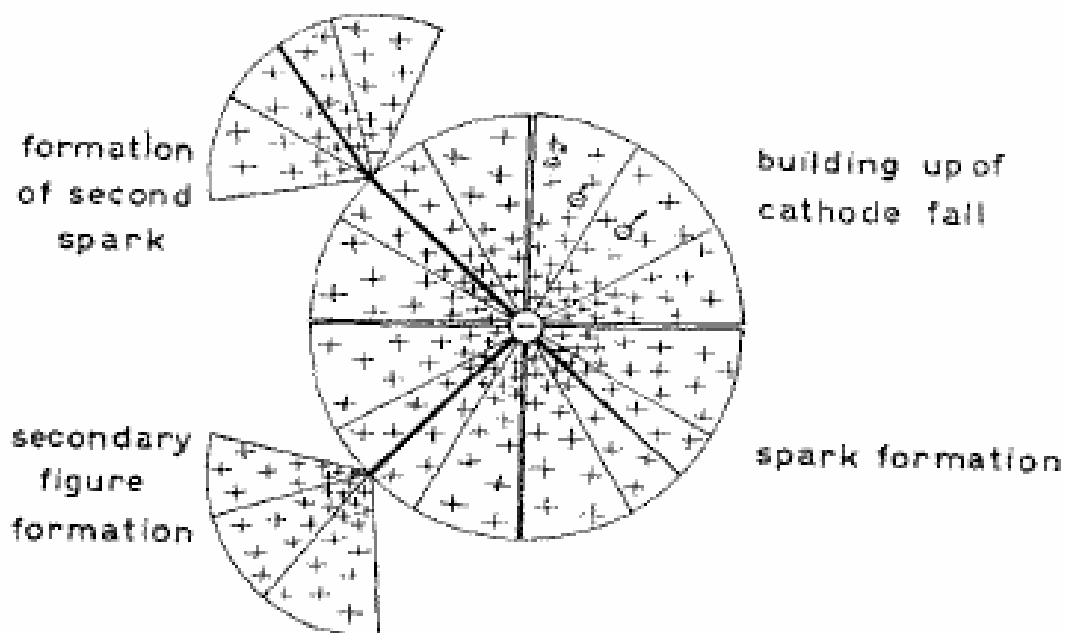


Рис. 5-1-7. Образование отрицательных стримеров.

**1999-Грушин Михаил Евгеньевич**, Троицк, Московской обл. ГНЦ ТРИНИТИ. Отдел низкотемпературной плазмы (ОНП). [http://www.triniti.ru/OPI\\_ONP.html](http://www.triniti.ru/OPI_ONP.html)  
**Акишев Юрий Семенович**, д.ф.м.н., нач. лаб. кинетики слабоионизированной плазмы.  
**Трушкин Николай Иванович**, в.н.с. д.ф.м.н.  
**Каральник Владимир Борисович**, к.ф.м.н.  
**Грушин Михаил Евгеньевич**, к.ф.м.н.

Проводят исследования барьерного разряда на поверхности диэлектрика (Surface dielectric barrier discharge, SDBD).

1999-Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Дерюгин А.А., Напартович А.П., Панькин М.В., Трушкин Н.И. Интегральные и локальные характеристики протяженной положительной короны в воздухе в режиме нелинейных колебаний: Эксперимент. Физика плазмы. 1999. т.25. №11. с.941-951.

2001-Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Трушкин Н.И. Пульсирующий режим отрицательной короны в азоте. I. Эксперимент. Физика плазмы. 2001. т.27. №6. с.550-562.

2001-Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Трушкин Н.И. Пульсирующий режим отрицательной короны в азоте. II. Расчет. Физика плазмы. 2001. т.27. №6. с.563-572.

2001-Грушин М.Е. Нестационарные явления в отрицательной короне и ее переход в режим тлеющего разряда. Диссертация кандидата физико-математических наук. Троицк. ТРИНИТИ. 2001. 137с.

2002-Акишев Ю.С., Демьянов А.В., Каральник В.Б. и др. О сходстве и различии барьерной короны с классическими разрядами барьерным и коронным /XI-я конф. по физике газового разряда. Рязань. РГРТА, 2002. Ч.1.

2007-Акишев Юрий Семенович, Грушин Михаил Евгеньевич, Трушкин Николай Иванович. Газоразрядная камера для создания низкотемпературной неравновесной плазмы. Патент **2370924**. 2009.

2001-Акишев Ю.С. Грушин М.Е. Каральник В.Б. Трушкин Н.И. Пульсирующий режим отрицательной короны в азоте. Эксперимент. Физика плазмы. 2001. т.27. 6. с.550-562.

2007-Акишев Ю.С. Грушин М.Е. Трушкин Н.И. Газоразрядная камера для создания низкотемпературной неравновесной плазмы. Патент **2370924**. 2009.+

2007-Каральник В.Б. Численное моделирование нестационарных процессов в слаботочных газовых разрядах. Диссертация кандидата физико-математических наук. Троицк. 2007. а+

2008-Y Lagmich, Th Callegari, L C Pitchford and J P Boeuf. Model description of surface dielectric barrier discharges for flow control. Journal of Physics D: Applied Physics Volume 41 Number 9.

2009-A Yu Starikovskii1, A A Nikipelov, M M Nudnova and D V Roupassov. SDBD plasma actuator with nanosecond pulse-periodic discharge. Plasma Sources Science and Technology Volume 18 Number 3.

2012-Yu Akishev, G Aponin, A Balakirev, M Grushin, V Karalnik, A Petryakov and N Trushkin. Spatial-temporal development of a plasma sheet in a surface dielectric barrier discharge powered by a step voltage of moderate duration. Plasma Sources Science and Technology Volume 22 Number 1.

2013-Yu Akishev, G Aponin, A Balakirev, M Grushin, A Petryakov, V Karal'nik and N Trushkin. Stepwise expansion of a surface dielectric barrier discharge as a result of alternation in formation of streamers and leaders. Journal of Physics D: Applied Physics Volume 46 Number 13.

2013-Yuri Akishev, Grigory Aponin, Anton Balakirev, Michail Grushin, Vladimir Karalnik, Alexander Petryakov and Nikolay Trushkin. DBD surface streamer expansion described using nonlinear diffusion of the electric potential over the barrier. Journal of Physics D: Applied Physics Volume 46 Number 46.

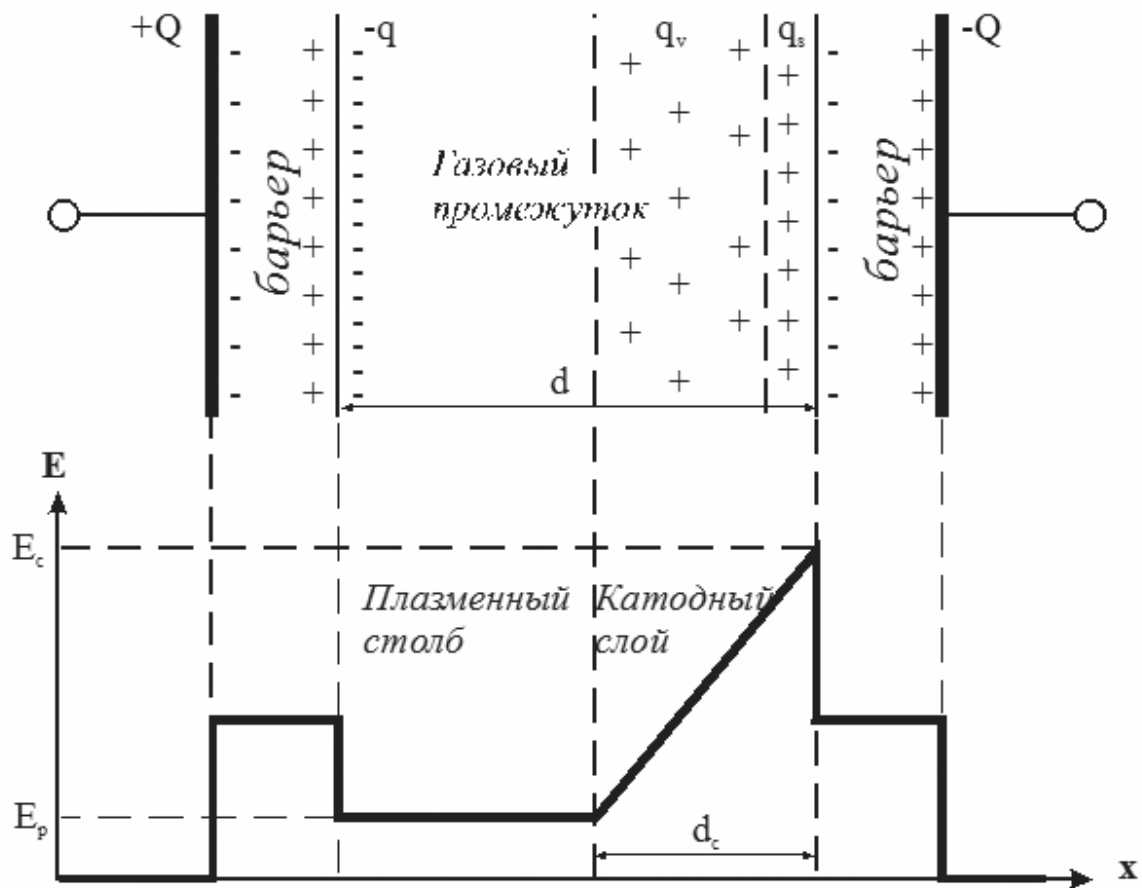


Рис. 5-1-8. Распределение электрических полей и зарядов при барьерном разряде.

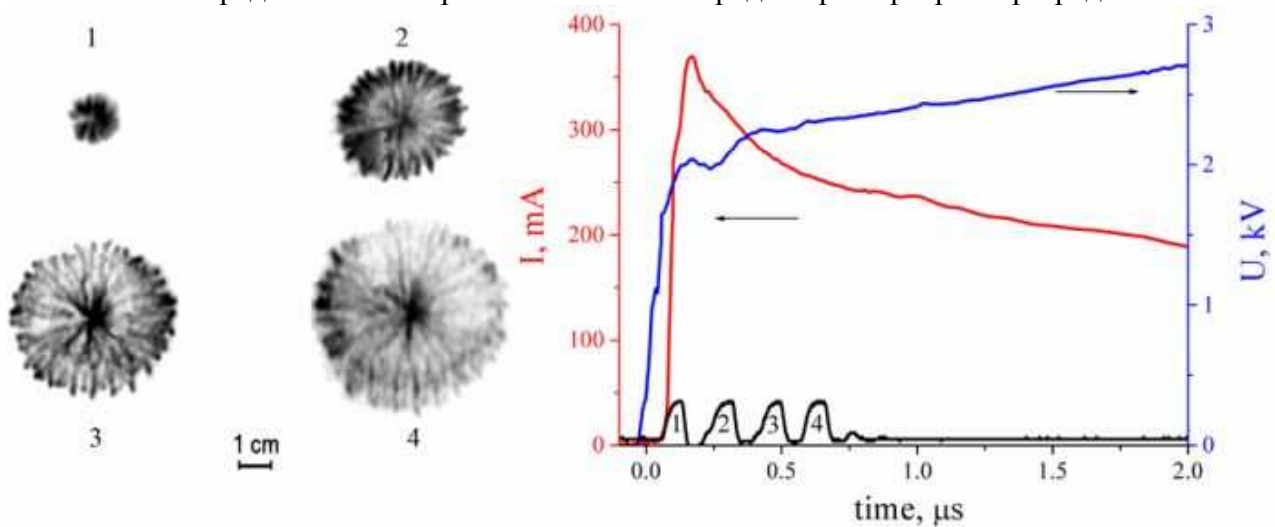


Рис. 5-1-9. Распространение стримеров при положительном импульсе.

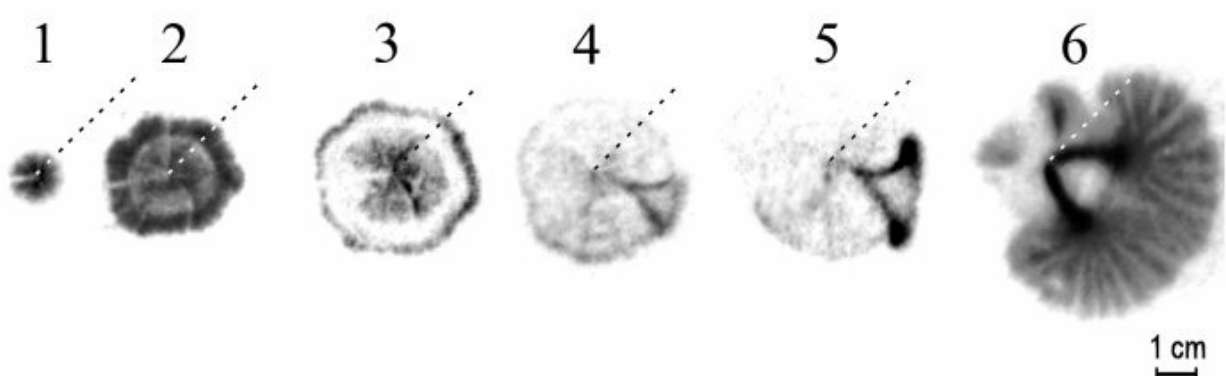
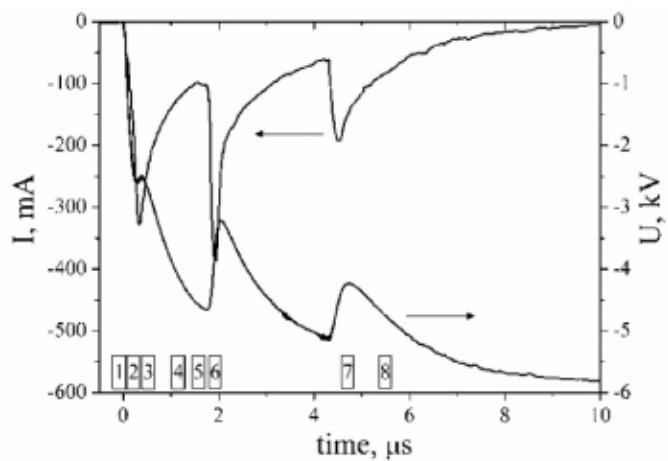
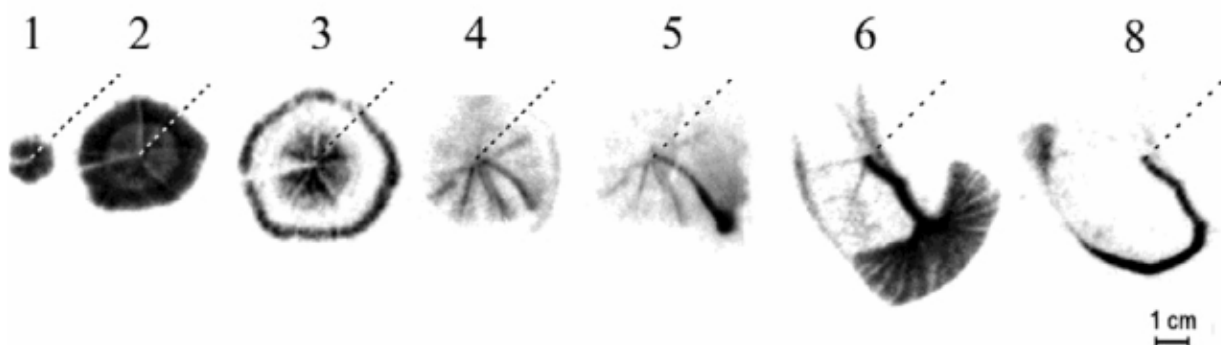


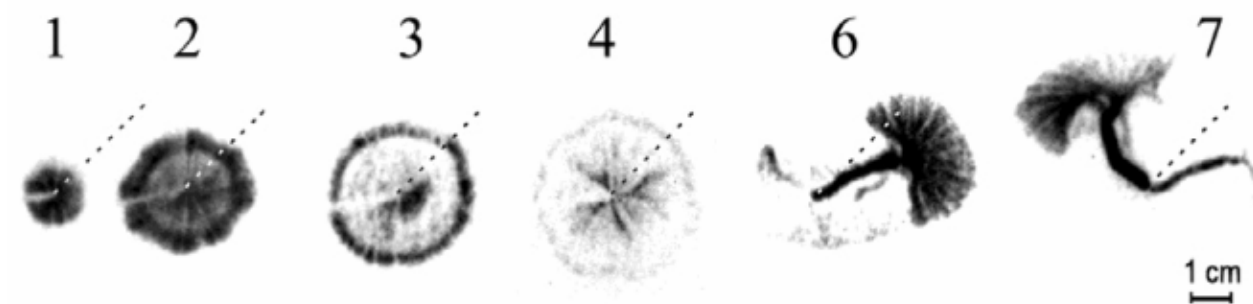
Рис. 5-1-10. Динамика формы стримеров при отрицательном импульсе.



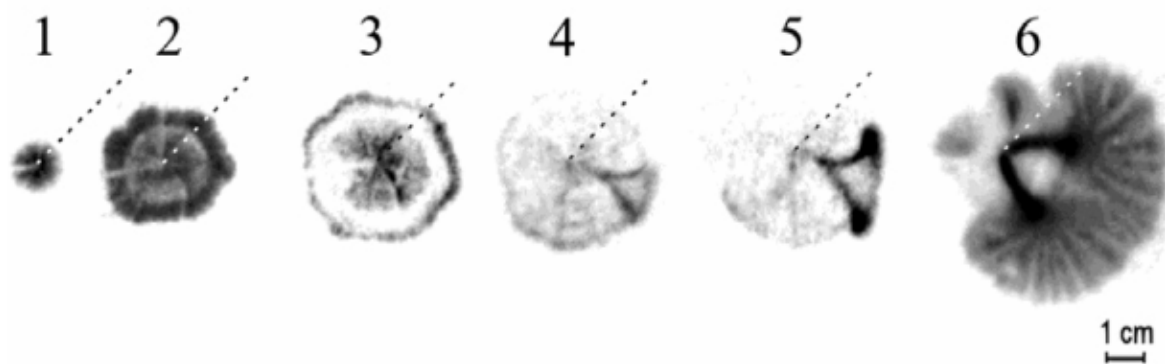
(a)



(b)



(c)



(d)

Рис. 5-1-11. Динамика развития стримеров.

2012-**Бойченко А.П.** Галогенсеребряная клидонография веерообразных стримеров барьерного разряда в воздухе атмосферного давления. Современные проблемы физики, биофизики и информационных технологий. Всероссийская заочная научно-практ. конф. Краснодар: Краснодарский ЦНТИ, 2012. с.249-256.

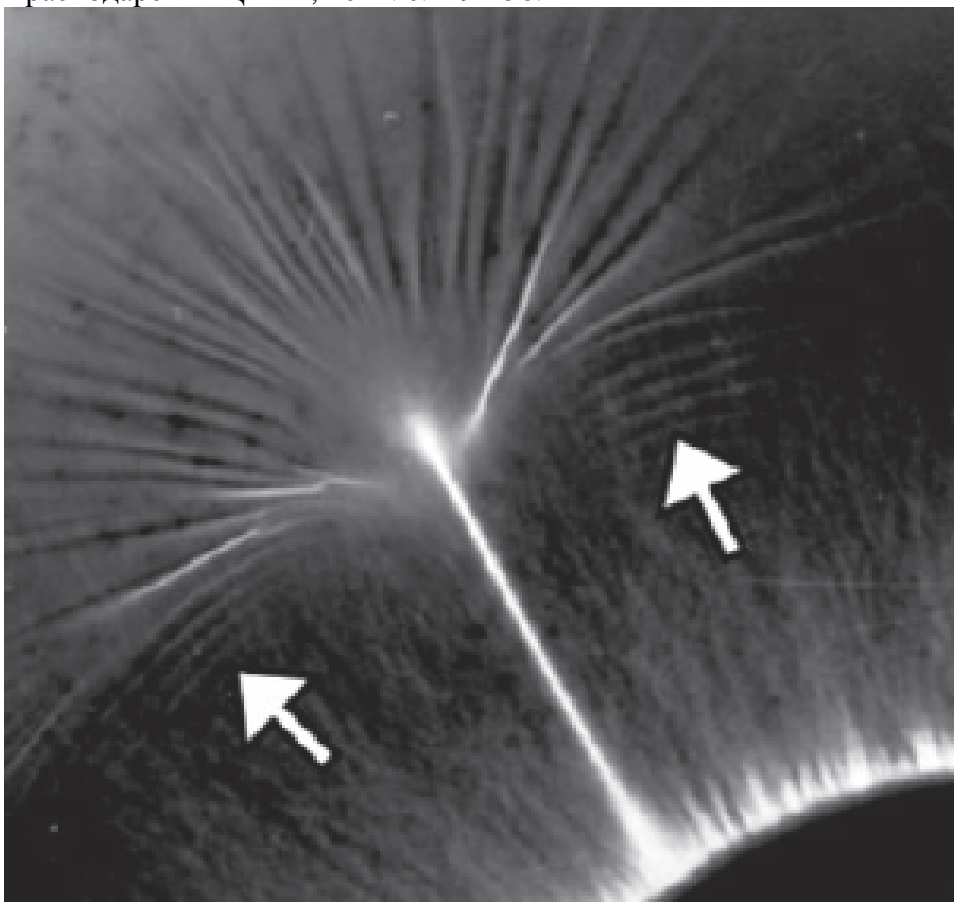


Рис. 5-1-12. Формирование стримера в виде веера.

---