

04

Формирование диффузного разряда при коротком фронте импульса напряжения и возможность модификации диэлектриков в таком разряде

© В.М. Орловский, В.А. Панарин, М.А. Шулепов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: orlovskii@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 30 января 2014 г.

Исследуются динамика формирования диффузного разряда при коротком фронте импульса напряжения (менее 1 ns) и наносекундной длительности импульса без дополнительного источника предьонизации и динамика формирования диффузного разряда при размещении в нем диэлектрической пленки. Показано, что диффузный разряд формируется за счет лавинного размножения заряда, инициируемого быстрыми электронами, и затем поддерживается за счет вторичных пробоев, распространяющихся по каналам ионизованного газа. При размещении диэлектрической пленки (полиэтилен, лавсан и т.д.) на аноде и многократном включении разряда наблюдались поверхностная и объемная модификации вещества. Для полиэтиленовой пленки отмечаются изменения спектра поглощения в ближней ИК-области.

В неоднородном электрическом поле при коротком фронте и наносекундной длительности импульса напряжения без дополнительного источника предьонизации возможно формирование объемного разряда в атомных и молекулярных газах давлением до 6 atm в He и до 3 atm в N₂ [1,2]. При наносекундной длительности импульса и его фронте единицы или доли единицы наносекунд удастся существенно увеличить удельную мощность энерговысвобождения в объемном разряде без предьонизации (до 800 MW/cm³). В определенных условиях в промежутке с неоднородным электрическим полем при атмосферном давлении воздуха и других газов формируется субнаносекундный поток электронов с плотностью до 10 A/cm² [3,4], который может быть сжат до ~ 20 ps [5]. Объемный разряд может быть использован для создания активной среды в молекулярных и атомных газах [4], а выведенный

за пределы газоразрядного промежутка субнаносекундный пучок для предыонизации среды в сжатых газах [6].

Целью предлагаемой работы является исследование динамики формирования импульсного разряда в воздухе и аргоне при коротком импульсе напряжения (фронт менее 1 ns) и возможности использования такого разряда для поверхностной и объемной модификации пленочных диэлектриков, размещаемых в газовом промежутке.

В наших опытах использовался источник импульсного напряжения РАДАН с напряжением 200–220 kV и фронтом импульса напряжения наносекунда и менее (частота импульсов 1 Hz). Катод имел четыре модификации и конструктивно был выполнен в виде трубки диаметром 7 mm из Ti (толщина 50 μm) — КТТ, фольгированного стеклотекстолита (толщина 200 μm) — КСТ и их модификации в виде катода из двух трубок диаметром 7 и 3 mm, размещенных одна в другой соосно со смещением наружу внутренней трубки на 2 mm — ККТТ и ККСТ. Анод представлял собой круглую пластину из латуни диаметром 28 mm с закругленными краями (радиус 3 mm) — АК, либо плоскую стальную сетку со световой прозрачностью 40% — АП. Интегральная картина свечения разряда фиксировалась фотоаппаратом SONY A100. Напряжение коаксиальной линии источника импульсного напряжения РАДАН (U_d) измерялось с помощью делителя напряжения; ток в цепи разряда (I_d) измерялся с помощью шунта, собранного из чип-резисторов с суммарным сопротивлением 0.04 Ω . Следует отметить, что делитель напряжения располагался в газовой среде и достоверность параметров импульса напряжения верна до появления плазмы в разряде. Параметры потока быстрых электронов (I_e) регистрировались двумя коллекторами. Один был выполнен на основе двухстороннего стандартного разъема. Площадка для регистрации параметров пучка электронов (диаметр 20 mm, латунь) размещалась в цилиндре с внутренним диаметром 25 mm (подвижная часть разъема) на центральной части разъема с одной из сторон, а другая сторона соединялась с кабелем. Измерения проводились при размещении в рабочей кювете фланца с коллектором [6]. Другой коллектор имел площадку для регистрации параметров потока электронов диаметром 3 mm. Конструктивно коллектор был выполнен таким образом, чтобы было согласование с волновым сопротивлением кабеля регистрации. Для контроля изменения состояния поверхности использовался фурье-спектрометр ФТ-801 с широкодиапазонным инфракрасным микроскопом МИКРАН-2. Для контроля импульсов напряжения, тока разряда и тока за плоским анодом

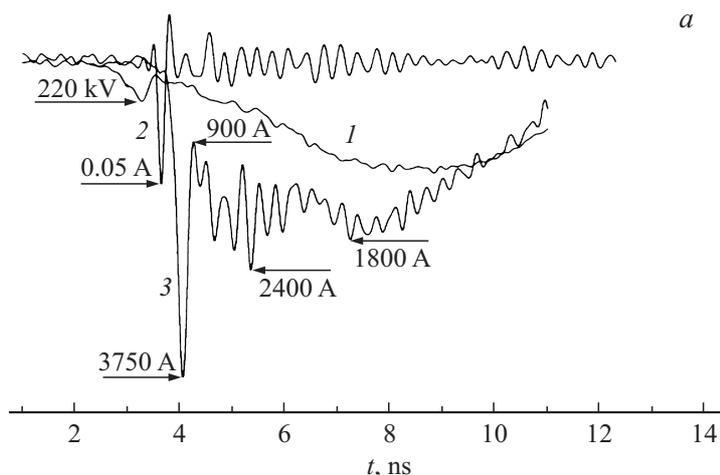


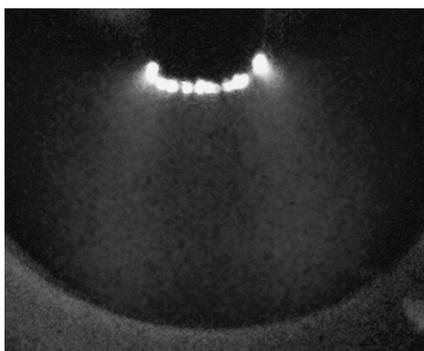
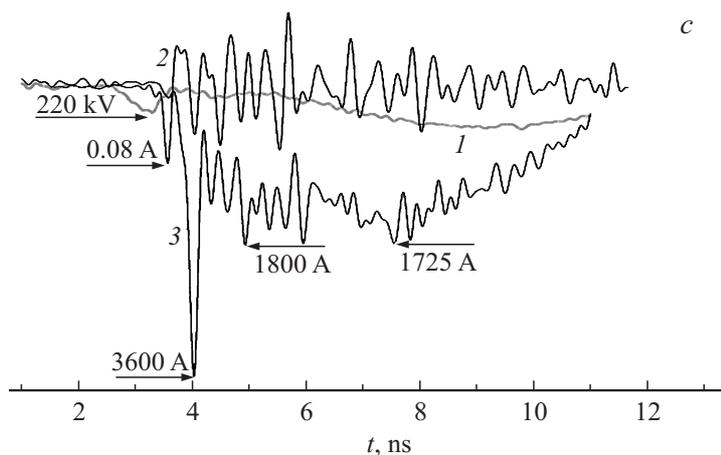
Рис. 1. Импульсы напряжения I , тока пучка 2 и тока разряда 3 в воздушной среде (a) и в аргоне (c); интегральное свечение разряда в аргоне при давлении 1 atm (b).

использовались осциллографы TDS-6604 (полоса пропускания 6 GHz) и TDS-3034 (полоса пропускания 300 MHz).

В качестве испытуемых объектов нами использовались: полиэтилен-терефталат (лавсан) толщиной $50 \mu\text{m}$, полиэтилен толщиной $40 \mu\text{m}$, тефлон толщиной $40 \mu\text{m}$, винипроз толщиной $400 \mu\text{m}$, электротехническая керамика толщиной 1 и 0.6 mm , которые размещались на аноде.

Как было показано в работах [1,2,6], в неоднородном электрическом поле при коротком фронте импульса напряжения разряд носит объемный характер и состоит при этом из струй в виде конусов с яркими пятнами на катоде.

Наши опыты проводились в воздухе и аргоне при давлении 1 atm. Расстояние анод (АП)–катод (КТГ) составляло 15 mm. На рис. 1 приведены осциллограммы импульсов напряжения, тока пучка, тока разряда для воздушной и аргонной сред и интегральное свечение разряда в аргоне. Коллектор имел площадку для регистрации параметров потока электронов диаметром 3 mm для воздуха и 20 mm для аргона. Разряд в обоих случаях носит объемный характер и представляет собой набор диффузных разрядов в виде конусов с яркими пятнами на катоде. Пятна

*b**c***Рис. 1** (продолжение).

в обоих случаях эквидистантно расположены по катоду, и для аргона имеем более равномерное свечение.

Динамика разряда такова, что импульс напряжения с фронтом менее 1 ns (в нашем случае 0.6 ns) приводит к появлению ионизационной волны и формированию потока быстрых электронов [7]. Из рис. 1 видно, что поток электронов формируется на фронте импульса напряжения и инициирует разряд в газовой среде, при этом длительность первого пика разряда коррелирует с длительностью тока быстрых электронов.

Запаздывание составляет $\sim 200\text{--}240$ ps и определяется временем лавинного нарастания тока. В дальнейшем мы имеем спад тока разряда и его нарастание, а также стабилизацию на уровне половины первого пика. Осциллограмма импульса быстрых электронов помимо основного пика имеет цуги из серии импульсов, составляющих по амплитуде 0.3 для воздуха и 0.8 для аргона, которые совпадают по времени с цугами колебаний тока разряда. Оценки изменения напряжения в процессе импульсного разряда тока по перенесенному заряду для импульса тока разряда в воздухе дают следующие величины: $33.3\text{ kV}\text{--}1.28\text{ ns}$, $80.6\text{ kV}\text{--}5.46\text{ ns}$, $100\text{ kV}\text{--}8.14\text{ ns}$. Изменения напряжения в процессе переноса заряда инициируют диффузные разряды за счет волн вторичного пробоя, распространяющихся по каналу ионизованного газа. Перемещение волн вторичного пробоя связано с перераспределением электрического поля, обеспечивающего ионизацию. Во фронте ионизации таких волн концентрация заряженных частиц может возрастать на порядки. Скорость волн вторичного пробоя может быть близка к скорости света [7]. Механизм формирования быстрых электронов во вторичном пробое в ионизованном газе обусловлен, как показано в работе [8], тем, что отставание времени нарастания напряжения от времени формирования катодного слоя приводит к приложению значительной части напряжения на катодный слой и формированию в нем быстрых электронов.

На рис. 2 представлены осциллограммы напряжения и тока пучка быстрых электронов для воздуха при использовании приемников для регистрации потока быстрых электронов с площадками диаметром 3 (рис. 2, *a*) и 20 mm (рис. 2, *b*). В первом случае наблюдается импульс тока пучка электронов длительностью 90 ps на полувывоте, образующийся при колебании импульса напряжения на фронте. Во втором случае наблюдаем три импульса: два вместе длительностью ~ 200 ps и один отдельно длительностью ~ 90 ps на полувывоте. Два первых возникают при колебании напряжения на фронте, а третий на спаде. Таким образом, суммарный ток потока электронов представляет собой набор их потоков, разнесенных во времени, возникающих как на фронте, так и на спаде импульса напряжения. Меняя фронт импульса напряжения, среду и конфигурацию катода, можно сократить временной интервал возникновения потоков быстрых электронов и увеличить плотность суммарного потока электронов. В нашем случае максимальные токи были получены для катода ККСТ. Разряд в этом случае носил диффузный

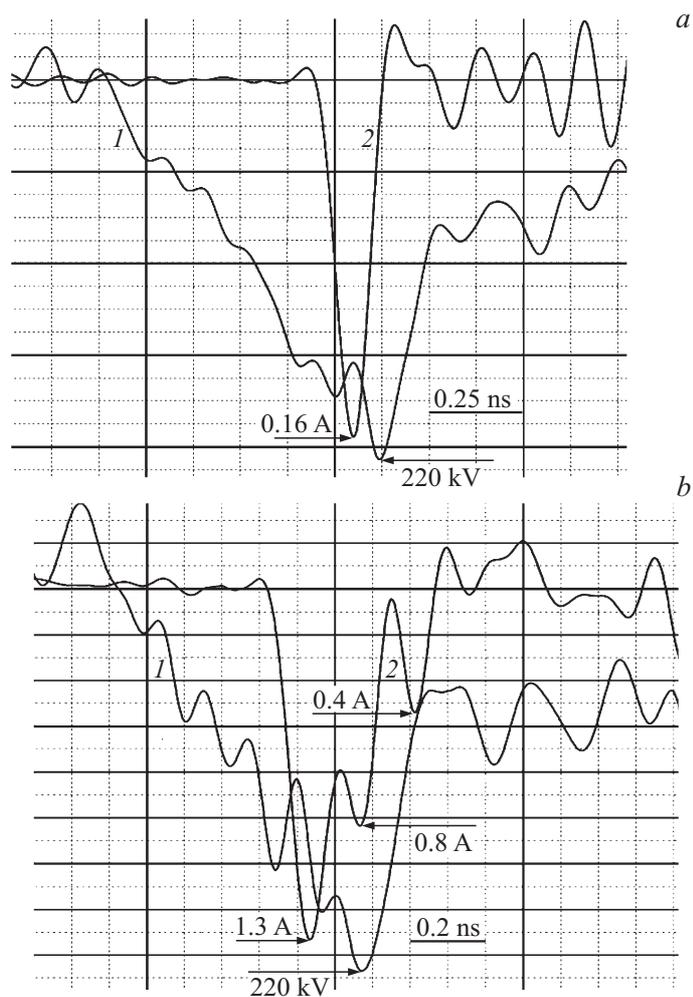


Рис. 2. Импульсы напряжения I , тока пучка 2 для коллекторов с диаметром приемной площадки: a — 3 mm и b — 20 mm.

характер и состоял из конфигураций в виде конусов с яркими пятнами на катоде, имеющими равномерное свечение.

При наложении диэлектрика на аноде либо катоде мы имеем дело с барьерным разрядом. В этом разряде процессы протекают при более высоких энергиях и он используется для увеличения синтеза продуктов в нем, и в первую очередь озона. Следует отметить, что наложение диэлектрика на анод приводит к появлению напряжения на пленке, которое может быть сопоставимо с напряжением на газовом промежутке, и приводит к существенному изменению вольт-амперной характеристик разряда, появлению высокочастотной составляющей в импульсе тока разряда. Размещение на аноде пленки лавсана и тефлона приводило в наших опытах к появлению пятен на аноде, а при включении разряда более 100 раз — к развитию устойчивого искрового канала. Искровой канал обусловлен наработкой окислов азота в замкнутом пространстве разрядной камеры. Использование катода ККСТ позволило получить устойчивый объемный разряд и увеличить число включений до появления искрового канала на фоне диффузного разряда для тефлона и лавсана до 220. При наложении на анод электротехнической керамики толщиной 1 мм на поверхности имеем регулярную структуру пятен, обусловленную токами смещения, что позволяет обеспечивать достаточно интенсивную подсветку в разряд. Наложение пленки полиэтилена на анод приводило к появлению пятен на аноде, а после 140 включений — к появлению искрового канала. В разряде с диэлектриками на аноде (лавсан, полиэтилен, керамика) напряжение на момент начала переноса заряда в газовом промежутке во всех случаях было ниже, чем в разряде без диэлектрика. Ток для разряда с керамикой на аноде имел типичный спад для диффузного объемного разряда, составлял примерно треть от начальной амплитуды и имел длину платы более, чем в других случаях.

На поверхности лавсана и полиэтилена после воздействия разрядом наблюдались слабые структурные изменения. В то же время никаких изменений на поверхности тефлоновой пленки зарегистрировано не было.

Проводились съемки фурье-спектров для всех вышеперечисленных пленок (облученных и нет) в диапазоне длин волн 1.8–18 μm . Отличия спектров поглощения облученного и необлученного объекта наблюдались для полиэтиленовой пленки (рис. 3). В спектре ИК-поглощения необлученной 40-микронной пленки полиэтилена $(-\text{CH}_2 - \text{CH}_2-)_2$ наблюдаются колебательные полосы с частотами (волновыми числами) 725, 1465, 2861, 2914 cm^{-1} . Две первые полосы 725, 1465 cm^{-1} принадлежат деформационным колебаниям. Полосы 2800, 2900 cm^{-1}

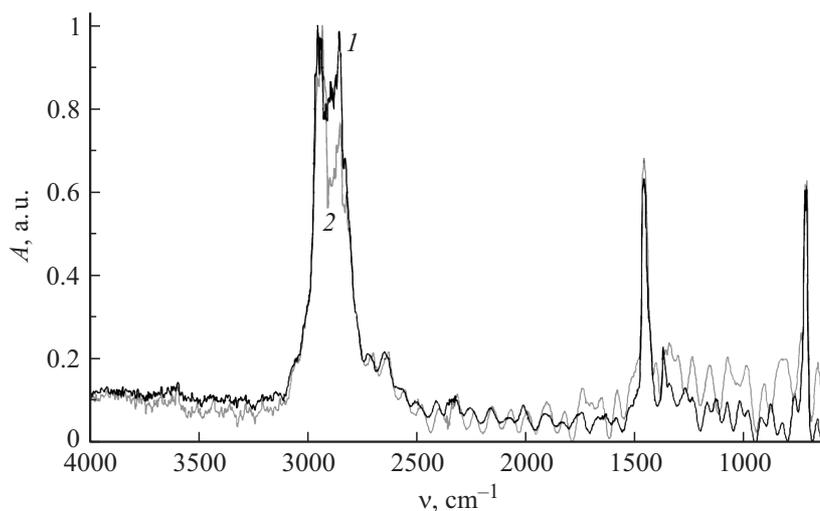


Рис. 3. Спектр поглощения полиэтилена $40\ \mu\text{m}$ (кривая 1 — исходный материал и 2 — после 120 включений разряда).

принадлежат валентным колебаниям. Изменение поглощения полиэтиленовой пленки после 120 включений разряда в воздухе наблюдается для валентной симметричной полосы $2861\ \text{cm}^{-1}$ (изменение $\sim 25\%$) и деформационных полос $725\ \text{cm}^{-1}$ (изменение $\sim 8\%$), $1465\ \text{cm}^{-1}$ (изменение $\sim 5\%$). Изменения, на наш взгляд, обусловлены формированием перекисных групп за счет окисления полиэтиленовой цепи. При этом возможно увеличение адгезии полиэтилена и восприимчивости взаимодействия в газах.

В работе исследована динамика формирования диффузного разряда при коротком фронте импульса напряжения и наносекундной длительности импульса напряжения без дополнительного источника предыонизации. Показано, что диффузный разряд формируется за счет лавинного размножения заряда, инициируемого быстрыми электронами, и затем поддерживается ионизационными волнами вторичных пробоев, распространяющимися по каналам слабоионизованного газа. При размещении диэлектрической пленки (полиэтилен, лавсан и т.д.) на аноде и многократном включении разряда возможна поверхностная и объемная модификации вещества.

Список литературы

- [1] *Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 10. С. 29.
- [2] *Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 20. С. 35.
- [3] *Orlovskii V.M., Tarasenko V.F.* // Proc. of the 15th International Conference on High-Power Particle Beams. St. Petersburg, 2005. P. 166.
- [4] *Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 11. С. 1007.
- [5] *Месяц Г.А., Яландин М.И., Реутова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 1. С. 34.
- [6] *Орловский В.М., Алексеев С.Б., Тарасенко В.Ф.* // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 11. С. 1033.
- [7] *Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филюгин И.В.* // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263.
- [8] *Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Королев Ю.Д.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 4. С. 52.