

03:04

Изменение воды, водных растворов и диэлектрических пленок в диффузном разряде, формируемом предыонизацией быстрыми электронами при коротком фронте импульса напряжения

© 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 7 апреля 2015 г.

Исследуется формирование диффузного разряда при коротком фронте импульса напряжения (менее 1 ns), а также при размещении в нем воды, водных растворов и диэлектрических пленок. При размещении диэлектрической пленки (полиэтилен, винипроз и т.п.), воды или водных растворов 3%-й перекиси водорода и 18%-го раствора $KMgO_4$ в воде на аноде наблюдался объемный разряд, а при многократном включении разряда было зафиксировано изменение спектра поглощения вещества. Анализ фурье-спектров поглощения в ИК-диапазоне показал отличия спектров поглощения облученной и необлученной полиэтиленовой пленки. Изменения спектра поглощения воды, 3%-го раствора перекиси водорода и 18%-го раствора $KMgO_4$ в воде состояли в том, что полоса валентных колебаний ОН-групп расширилась без явно выраженных максимумов для исследуемых жидкостей. Таким образом, объемный диффузный разряд в молекулярных и атомарных газах может использоваться для модификации диэлектриков, воды и водных растворов.

Использование потока электронов длительностью от единиц наносекунд до единиц микросекунд для предыонизации сжатых газов позволило формировать объемный разряд в молекулярных и атомарных газах давлением до 10 atm и выше [1]. В работе [2] показано, что для реализации объемного разряда можно использовать импульс тока пучка с длительностью до ~ 1 ns. В неоднородном электрическом поле посредством наносекундного импульса напряжения с фронтом субнаносекундной длительности возможно формирование объемного разряда без дополнительного источника предыонизации в молекулярных

и атомарных газах давлением до 6 atm в He до 3 atm в N₂ [3,4]. При наносекундном импульсе и длительности его фронта в единицы или доли единицы наносекунд формируется ионизационная волна, что приводит к появлению потока электронов субнаносекундной длительности, который инициирует разряд в газовой среде [5]. В таком объемном разряде удастся существенно увеличить удельную мощность энерговыклада без внешнего источника предьонизации. 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], а его длительность может быть уменьшена до ~ 20 ps [6]. Объемный разряд используется для создания активной среды в молекулярных и атомарных газах [7], модификации пленочных диэлектриков [5], а выведенный за пределы газоразрядного промежутка субнаносекундный пучок — для предьонизации среды в сжатых газах [8].

Целью представленной работы является исследование динамики формирования импульсного разряда в воздухе и аргоне, инициируемого коротким импульсом напряжения (фронт менее 1 ns) при размещении воды, водных растворов и пленочных диэлектриков в газовом промежутке, а также использования такого разряда при многократных включениях для поверхностной и объемной модификации упомянутых материалов.

В наших опытах использовался источник импульсного напряжения РАДАН с напряжением 200–220 kV и фронтом импульса напряжения 1 ns и менее. В качестве катода использовалась конфигурация в виде трубки диаметром 7 mm из титановой фольги (толщина 50 μm). Анод представлял собой круглую пластину из латуни диаметром 28 mm с закругленными краями (радиус 3 mm) либо плоскую стальную сетку со световой прозрачностью 40%. Анод в опытах с жидкостями имел форму чаши глубиной 1.5 mm. Интегральная картина свечения разряда фиксировалась фотоаппаратом SONY A100. Напряжение измерялось с помощью емкостного делителя; ток в цепи разряда измерялся посредством шунта, собранного из чип-резисторов с суммарным сопротивлением 0.04 Ω. Следует отметить, что емкостный делитель располагался в газовой среде, и достоверность параметров импульса напряжения верна только до появления плазмы в разряде. Параметры потока быстрых электронов регистрировались двумя коллекторами. Один был выполнен на основе двухстороннего стандартного разъема, с площадкой из латуни диаметром 20 mm, для фиксации параметров

потока электронов [6]. Другой имел площадку для фиксации параметров потока электронов диаметром 3 mm. Контроль состояния поверхности осуществлялся фурье-спектрометром ФТ-801 с широкодиапазонным инфракрасным микроскопом МИКРАН-2. Для контроля импульсов напряжения, тока разряда и тока за плоским анодом использовались осциллографы TDS-6604 (полоса пропускания 6 GHz) и TDS-3034 (полоса пропускания 300 MHz).

В качестве испытуемых объектов нами использовались: вода, 3%-й водный раствор H_2O_2 , 18%-й водный раствор $KMgO_4$, полиэтилен толщиной $40 \mu m$, винипроз толщиной $400 \mu m$, которые размещались на аноде.

Как было показано в работах [3,4,8], 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. В работе [5] 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.

Эксперименты проводились в воздухе и аргоне при давлении 1 atm. Расстояние анод–катод составляло 15 mm. Опыты проводились с размещением пленки винипроза ($400 \mu m$) на аноде (сетка из нержавеющей стали) в аргонной среде и полиэтиленовой пленки ($40 \mu m$) на аноде в воздушной среде. Опыты с водой и водными растворами проводились в атмосфере воздуха, при расположении жидкостей на аноде, выполненном в виде чаши.

На рис. 1 приведены осциллограммы импульсов тока пучка, тока разряда и импульсов напряжения для аргонной среды атмосферного давления при наложении на анод (сетка) пленки винипроза толщиной $400 \mu m$ (a) и импульсов напряжения и тока разряда при размещении на аноде воды (b).

Разряд и в случае воздействия на полимер, и в случае воздействия на воду носил объемный характер и представлял собой набор диффузных разрядов в виде конусов с яркими пятнами на катоде. Пятна в обоих случаях эквидистантно расположены по катоду, но для аргона имело место более равномерное свечение.

В случае размещения на аноде пленки импульс напряжения с фронтом менее 1 ns (в нашем случае 0.6 ns) приводит к появлению

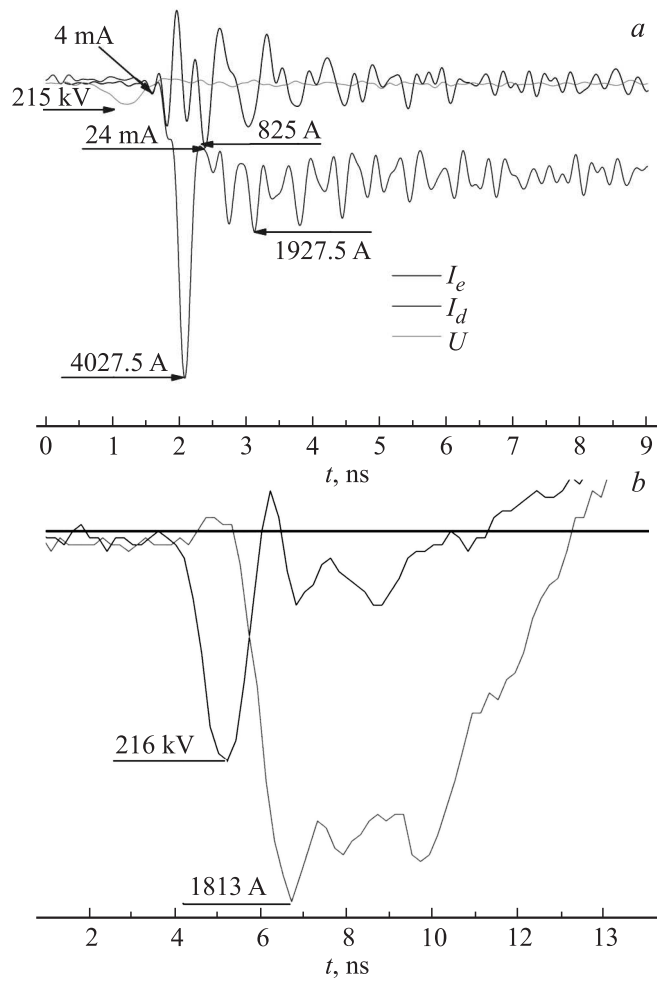


Рис. 1. Осциллограммы импульсов тока пучка I_e , тока разряда I_d и напряжения U в аргоне при размещении на аноде пленки из винилпроза ($400 \mu\text{m}$) при давлении 1 atm (a) и импульсов напряжения и тока разряда при размещении на аноде воды (b).

ионизационной волны и формированию потока быстрых электронов [9]. Из рис. 1 видно, что поток электронов формируется на изменении импульса напряжения и инициирует разряд в газовой среде, при этом длительность первого пика разряда коррелирует с длительностью тока быстрых электронов и определяется временем лавинного нарастания тока, как и в случае разряда без пленки [5]. В дальнейшем происходит спад тока разряда до уровня одной трети первого пика. Эта часть импульса тока определяется процессами изменения заряда пленки и коррелирует с изменением тока пучка быстрых электронов, фиксируемых за анодом, вне разряда.

Ток разряда в воздухе при размещении жидкости на аноде (рис. 1, *b*) имеет ту же динамику на начальном этапе, но не имеет ярко выраженного первого пика.

Анализ фурье-спектров поглощения в ИК-диапазоне показал отличия спектров поглощения облученного и необлученного образцов. Изменение спектра поглощения полиэтиленовой пленки после 120 включений разряда в воздухе наблюдается для валентной симметричной полосы 2861 см^{-1} (изменение $\sim 25\%$) и деформационных полос 725 см^{-1} (изменение $\sim 8\%$), 1465 см^{-1} (изменение $\sim 5\%$). Изменения, на наш взгляд, обусловлены формированием перекисных групп за счет окисления молекулярных цепей полиэтилена. При этом возможно увеличение адгезии и восприимчивости взаимодействия в газах.

Исследования ИК-спектров поглощения воды показали наличие частот валентной симметричной полосы ν_1 , валентной асимметричной полосы ν_3 и обертонов деформационной полосы $2\nu_2$ в диапазоне $3700\text{--}2940\text{ см}^{-1}$ без явно выраженных максимумов; деформационной полосы ν_2 с максимумом 1649.8 см^{-1} и составной крутильной и деформационной полос $\nu_L + \nu_2$ с максимумом 2134 см^{-2} . Изменения поглощения воды после 1200 включений разряда в воздухе состояли в том, что полоса валентных колебаний ОН-групп расширилась и стала $3700\text{--}2840\text{ см}^{-1}$.

Исследования ИК-спектров пропускания 3%-го водного раствора H_2O_2 (рис. 2, *a*) показали наличие полос валентных колебаний ОН-групп $3700\text{--}2740\text{ см}^{-1}$ с выраженным пиком 2839 см^{-1} , деформационной полосы с максимумом 1652 см^{-1} и составной крутильной и деформационной полос с максимумом 2118 см^{-2} . Изменения поглощения раствора H_2O_2 после 1200 включений разряда в воздухе состояли в том, что полоса валентных колебаний ОН-групп расширилась и стала $3750\text{--}2840\text{ см}^{-1}$ без явно выраженных максимумов.

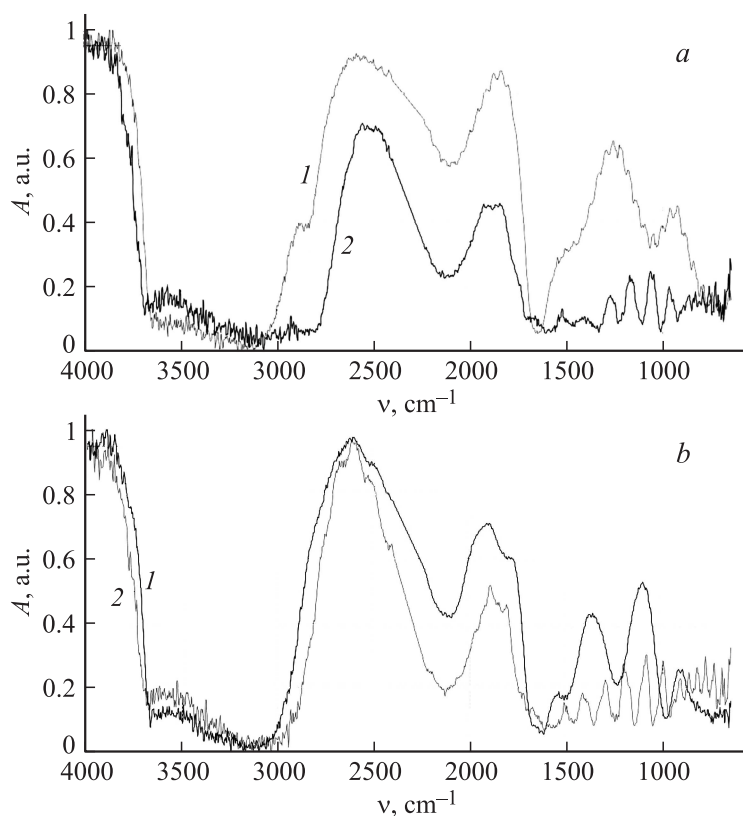


Рис. 2. Спектры пропускания: *a* — 3%-го водного раствора H_2O_2 (1) и 3%-го водного раствора H_2O_2 , облученного в процессе 1200 включений разряда (2); *b* — 18%-го водного раствора KMgO_4 (1) и 18%-го водного раствора KMgO_4 , облученного в процессе 1200 включений разряда (2).

Исследования ИК-спектров пропускания 18%-го водного раствора KMgO_4 (рис. 2, *b*) показали наличие частот валентной симметричной полосы ν_1 , валентной асимметричной полосы ν_3 и обертонов деформационной полосы $2\nu_2$ в диапазоне $3700\text{--}2940\text{ cm}^{-1}$ без явно выраженных максимумов; деформационной полосы ν_2 с максимумом 1649.8 cm^{-1} и составной крутильной и деформационной полос $\nu_L + \nu_2$ с макси-

мумом 2134 см^{-2} . Изменения поглощения раствора KMgO_4 после 1200 включений разряда в воздухе состояли в том, что полоса валентных колебаний ОН-групп расширилась и стала $3750\text{--}3150\text{ см}^{-1}$.

Во всех случаях изменения в ИК-спектрах воды и водных растворов после многократного включения разряда связаны с расширением полосы валентных колебаний ОН-групп и, возможно, обусловлены изменением компоновки молекул воды в кластеры [10].

В результате исследований показано, что разряд, инициируемый быстрыми электронами, формируемыми на фронте импульса напряжения (менее 1 ns), без дополнительного источника предыонизации, при размещении в нем воды, водных растворов и диэлектрических пленок сохраняет объемный характер. При размещении диэлектрической пленки (полиэтилен, винипроз и т.п.), воды или 3%-го водного раствора H_2O_2 и 18%-го водного раствора KMgO_4 на аноде, наблюдался объемный разряд, а при многократном включении разряда было зафиксировано изменение спектра поглощения вещества. Анализ фурье-спектров поглощения в ИК-диапазоне показал различие между спектрами поглощения облученной и необлученной полиэтиленовой пленки. При этом возможно увеличение адгезии пленки и ее восприимчивости взаимодействия с газами. Изменения спектра поглощения воды, 3%-го водного раствора перекиси водорода и 18%-го водного раствора перманганата калия состояли в том, что полоса валентных колебаний ОН-групп расширилась без явно выраженных максимумов для исследуемых жидкостей. Возможно такая ситуация обусловлена изменением компоновки молекул воды в кластеры. Таким образом, объемный диффузный разряд в молекулярных и атомарных газах может использоваться для модификации диэлектриков и изменения свойств воды и водных растворов.

Список литературы

- [1] Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А., Сучков Ю.Ф. // УФН. 1974. Т. 114. Вып. 2. С. 213–247.
- [2] Карпов В.М., Месяц Г.А., Орловский В.М., Осипов В.В., Потеряев А.Г. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 12. С. 2335.
- [3] Бакит Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 12. С. 29.
- [4] Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 20. С. 35.

- [5] *Орловский В.М., Панарин В.А., Шулепов М.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 14. С. 86.*
- [6] *Месяц Г.А., Яландин М.И., Реутова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 1. С. 34.*
- [7] *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.*
- [8] *Орловский В.М., Алексеев С.Б., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 11. С. 1033.*
- [9] *Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филогин И.В. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263.*
- [10] *Луговской А.А., Поплавский Ю.А., Сердюков В.И., Синица Л.Н. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 5. С. 418.*