

Влияние частоты следования импульсов на спектры ёмкостного разряда при давлении воздуха 1 Торр

Н.П. Виноградов, В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакирт*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**vinikitavin@mail.ru*

Аннотация. Исследовано влияние полярности и частоты следования импульсов напряжения генератора на спектры излучения ёмкостного разряда в областях расположения внешних кольцевых электродов и на удалении от них. Установлено, что отношение пиковых интенсивностей ионной N_2^+ ($\lambda = 391.4$ нм) и молекулярной N_2 ($\lambda = 394.3$ нм) полос азота к частоте убывает по мере удаления от кольцевых электродов. При этом, в области между электродами полученные зависимости подобны зависимостям в области, которая отстает от кольцевых электродов на 11 см, как по форме, так и по значениям отношения пиковых интенсивностей полос азота, что объясняется ослаблением электрического поля в центральной части межэлектродной области. Показано, что отношение интенсивностей полос N_2^+/N_2 в областях у электродов при отрицательной полярности импульса напряжения при всех рассматриваемых частотах выше, чем при положительной полярности. В областях, удалённых от электродов, картина меняется на противоположную, в них отношение интенсивностей N_2^+/N_2 уже при положительной полярности больше, чем при отрицательной.

Ключевые слова: частота импульсов генератора, полярность импульсов, ёмкостный разряд, интенсивность полос N_2 .

1. Введение

В течение последних трех десятилетий активно изучаются атмосферные разряды, наблюдаемые на высотах от 20 км до 100 км над уровнем моря [1–3], которые получили название скоротечные оптические явления (СОЯ). СОЯ включают в себя многие виды высотных разрядов. Наиболее распространенным видом СОЯ являются красные спрайты [1, 3]. Обычно они появляются над мезомасштабными конвективными системами и представляют собой оптические вспышки красного цвета, возникающие в результате электрических разрядов в мезосфере над грозовыми облаками, см., например, [1, 3]. Красные спрайты зарождаются на высоте около 75 км и распространяются как к поверхности земли (до высоты около 50 км), так и в противоположном направлении (до высот около 100 км). Первое задокументированное наблюдение красных спрайтов относится к публикации черно-белых фотографий в 1990 году [5]. Вскоре последовали наблюдения из космоса [4, 6] и с самолета [7]. Форма красных спрайтов очень разнообразна и зависит от многих условий. Спрайты имеют размеры в десятки километров и с Земли фотографируются при удалении от них на большие расстояния (обычно более 100 км). Это необходимо чтобы облака, которые расположены внизу, не мешали наблюдениям. К настоящему времени установлено, что распространение столбчатых спрайтов связано со стримерным механизмом пробоя, см., например, [8].

Исследование свойств спрайтов в естественных условиях требует больших материальных затрат и сложной аппаратуры, поэтому предпринимаются попытки изучения их аналогов в лабораторных условиях [9–13]. В 2022 году нами было показано [9, 13], что для формирования аналогов красных спрайтов в лабораторных условиях можно использовать ёмкостный разряд, который инициирует плазменные диффузные струи (ПДС) длиной до 100 см. При этом их фронт достигает торцевых фланцев.

Импульсно-периодический режим разряда был выбран для облегчения наблюдения и фотографирования ПДС при их регистрации. Формируемые струи состояли из стримеров, имеющих красный цвет [9, 13] и по многим параметрам, таким как скорость фронта, спектры излучения, величина приведённого электрического поля и другим, соответствовали свойствам

столбчатых спрайтов. В [13] было установлено, что ПДС могут состоять из нескольких стримеров красного цвета. Моделирование красных спрайтов в лабораторных условиях является актуальным, так как остается еще много нерешенных вопросов, связанных с условиями возникновения красных спрайтов, динамикой их распространения и сохранением красного цвета при низких давлениях воздуха.

В предыдущих наших работах, посвящённых моделированию аналогов красных спрайтов, обычно применялся импульсно-периодический ёмкостной разряд с частотой следования импульсов 21 кГц. Это позволяло увеличить яркость свечения ПДС и формировать их на расстоянии от боковых стенок кварцевой трубки. В экспериментах изменялись давление, состав газа, напряжение и полярность генератора, работающего в импульсно-периодическом режиме. Однако исследований при изменении частоты следования импульсов напряжения не проводилось.

Целью работы является получение спектральных характеристик разряда в различных областях плазменных диффузных струй и плазмы ёмкостного разряда, инициирующего ПДС, при изменении полярности и частоты следования импульсов напряжения генератора. При этом ставилась задача уменьшить частоту следования импульсов напряжения.

2. Экспериментальная установка и методики

Установка состояла из кварцевой трубки, кольцевых электродов и высоковольтного генератора. Марка кварцевой трубки – GE 214. Кварцевая трубка была прозрачной в УФ и видимой области спектра, имела длину 220 см, внутренний диаметр 50 мм и толщину стенки 2.5 мм. В трубку напускался комнатный воздух, который откачивался до давления 1 Торр, это давление не изменялось в течение всего эксперимента. На внешней поверхности трубки располагались два кольцевых электрода из нержавеющей стали шириной 1 см, расстояние между которыми было 6 см. Левый кольцевой электрод был заземлен, а на правый подавались импульсы напряжения от высоковольтного генератора. Генератор работал в импульсно-периодическом режиме, формировал импульсы напряжения с амплитудой ≈ 7 кВ и длительностью на полувысоте ≈ 1.3 мкс. Фронт и спад импульсов напряжения имели длительность около 0.4 мкс. Полярность генераторов могла быть как положительной, так и отрицательной. Частота следования импульсов менялась от 1 до 21 кГц.

Спектры излучения измерялись с помощью спектрометра HR2000+ES (OceanOptics Inc.). Спектральная чувствительность прибора и пропускание световода в диапазоне 200–1100 нм были известны, а разрешение оптической системы составляло не менее 0.9 нм. Спектры регистрировались в 6 разных точках, 5 из которых находились около электродной области, одна – на удалении от нее. Подробная схема расположения точек в различных областях кварцевой трубки изображена на Рис. 1.

3. Результаты и их обсуждение

В статье [14] приведены доказательства возможности использования методики для определения электронной температуре T_e и приведенной напряженности электрического поля E/N , основанной на регистрации соотношения пиковых интенсивностей ионной N_2^+ ($\lambda = 391.4$ нм) и молекулярной N_2 ($\lambda = 394.3$ нм) полос азота. В качестве рабочего газа в статье используется азот атмосферного давления. В данной работе используется комнатный воздух при давлении 1 Торр. Поэтому в статье не приводятся величины T_e и E/N , определённые по отношениям интенсивностей N_2^+/N_2 , но эти данные позволяют оценивать тенденцию изменения этого отношения в различных областях разряда.

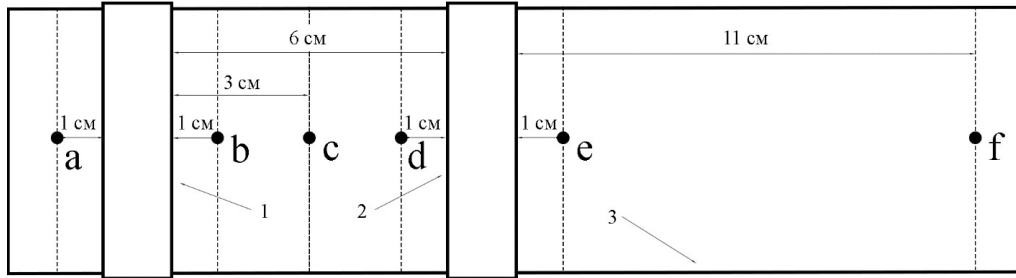


Рис. 1. Рисунок кварцевой трубки с кольцевыми электродами, с указанием точек, в которых регистрировались спектры излучения разряда при разных полярностях и частотах напряжения генератора.
1 – высоковольтный электрод, 2 – заземленный электрод, 3 – кварцевая трубка.

Отношение интенсивностей N_2^+ к N_2 сравнивалось при двух полярностях импульса напряжения и разных частотах (величины применяемых частот – 1, 3, 10, 21 кГц). Во всех рассматриваемых точках кривая зависимости отношения интенсивностей N_2^+/N_2 от частоты следования импульсов при отрицательной полярности импульса напряжения повторяла кривую при положительной полярности, отличались только амплитуды импульсной мощности излучения в соответствующих частотах точек.

В точках *a*, *b*, *c* отношение N_2^+/N_2 при отрицательной полярности импульса напряжения при всех рассматриваемых частотах выше, чем при положительной полярности. В точках *d*, *e*, *f* картина меняется на противоположную, отношение интенсивностей N_2^+/N_2 уже при положительной полярности было больше, чем при отрицательной. Данное изменение, по-видимому, обусловлено формированием прикатодной области с более высокой напряжённостью электрического поля. Подобное усиление поля за счёт накопления положительных ионов реализуется при тлеющем разряде.

Наибольшие значения отношения интенсивностей N_2^+ к N_2 были зарегистрированы в точках *a*, *b*, *c*. Первые две точки находятся около потенциального электрода, графики распределения отношения интенсивностей N_2^+/N_2 к частоте изображены на Рис. 2 и 3.

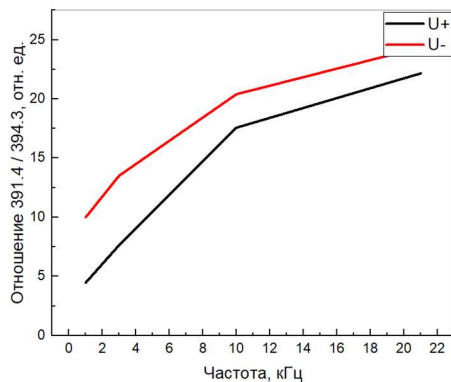


Рис. 2. Отношения интенсивностей N_2^+/N_2 к частоте для точки «а». Красная кривая соответствует отрицательной полярности импульса напряжения, черная – положительной.

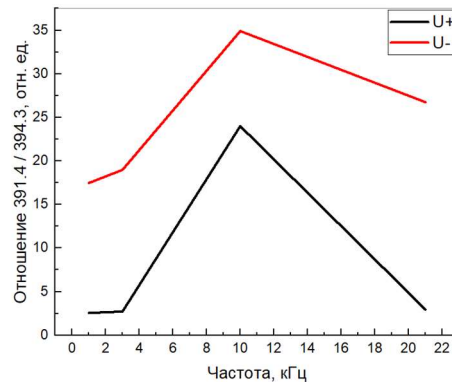


Рис. 3. Отношения интенсивностей N_2^+/N_2 к частоте для точки «б». Красная кривая соответствует отрицательной полярности импульса напряжения, черная – положительной.

Как видно из графиков на Рис. 2 и 3, кривые отношения интенсивностей N_2^+/N_2 к частоте при положительной и отрицательной полярности импульса напряжения подобны, отличаются только пиковые значения отношения N_2^+ к N_2 . Как можно заметить из Рис. 2, увеличение частоты импульсов напряжения приводит к увеличению отношения интенсивностей N_2^+/N_2 , которое достигает своего максимума при максимальном значении частоты (21 кГц). На Рис. 3

можно заметить стадию роста отношения пиковых интенсивностей, которая заканчивается при 10 кГц, при этой же частоте достигается максимальное значение отношения интенсивностей N_2^+/N_2 , полученное во всех экспериментах, и стадию спада, которая заканчивается при 21 кГц.

Кривая отношения интенсивностей N_2^+/N_2 к частоте для точки *e* изображена на Рис. 4.

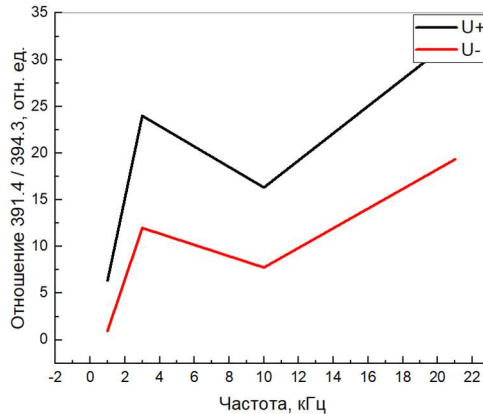


Рис. 4. Отношения интенсивностей N_2^+/N_2 к частоте для точки «e». Красная кривая соответствует отрицательной полярности импульса напряжения, черная – положительной.

График рассматриваемых отношения в точке «с» имеет уже 3 стадии, рост, спад и снова рост. В данном случае, минимальное значения на графике достигается при минимальной частоте в 1 кГц для двух полярностей импульса напряжения, а максимальное – при максимальном значении частоты (21 кГц).

В наших предыдущих работах [9], рассчитывались значения T_e и E/N , в которых четко прослеживалось уменьшение значений T_e и E/N при удалении от кольцевых электродов. В данной работе тенденция уменьшения отношения интенсивностей N_2^+ к N_2 по мере удаления от кольцевых электродов также прослеживается. При этом интересно, что в точке между электродами (точка «с») кривая напоминает кривую в точке *f*, которая отстоит от кольцевых электродов на 11 см, как по форме, так и по значениям отношения пиковых интенсивностей полос азота, хотя точка *c* находится в межэлектродной области (Рис. 5 и 6). Данный результат также можно объяснить уменьшением электрического поля в точке «с» из-за удаления от обоих электродов.

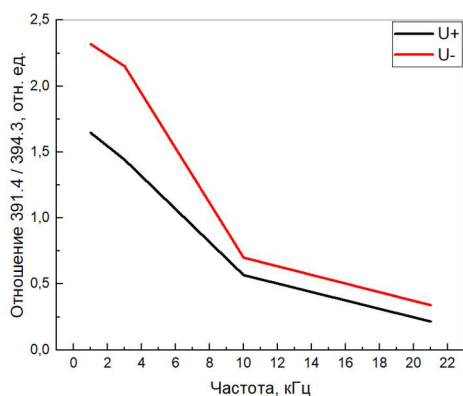


Рис. 5. Отношения интенсивностей N_2^+/N_2 к частоте для точки «с». Красная кривая соответствует отрицательной полярности импульса напряжения, черная – положительной.

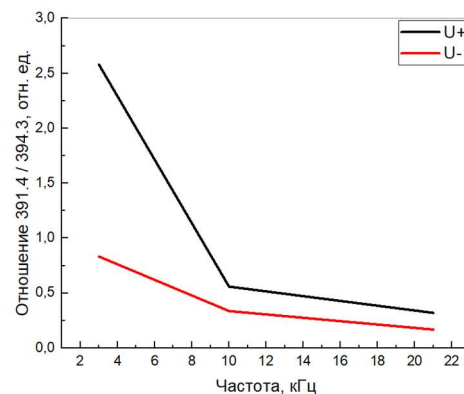


Рис. 6. Отношения интенсивностей N_2^+/N_2 к частоте для точки «f». Красная кривая соответствует отрицательной полярности импульса напряжения, черная – положительной.

4. Заключение

Исследование влияния полярности и частоты следования импульсов напряжения генератора на спектры излучения ёмкостного разряда в областях около кольцевых электродов и на удалении от них показало следующие результаты. Установлено, что в точке между электродами (точка c) эта зависимость аналогична точке « e », удалённой от электродов на 11 см, как по форме, так и по значениям отношения пиковых интенсивностей, несмотря на нахождение точки c в межэлектродной области. Кроме того, в точках a , b , c отношение интенсивностей N_2^+/N_2 при отрицательной полярности импульсов напряжения превышает аналогичное значение при положительной полярности для всех рассматриваемых частот. В то же время, в точках d , e , f наблюдается обратная тенденция, где отношение интенсивностей N_2^+/N_2 при положительной полярности выше, чем при отрицательной. Также установлено, что отношение пиковых интенсивностей ионной полосы азота N_2^+ ($\lambda = 391.4$ нм) к молекулярной полосе N_2 ($\lambda = 394.3$ нм) по мере удаления от кольцевых электродов, также снижается при более низкой частоте, чем исследовалось в наших предыдущих работах (смотри, например [9]). Что может свидетельствовать о том, что моделирование красных спрайтов в лабораторных условиях также возможно и при более низких частотах, что приближает наши эксперименты к реальным условиям зарождения красных спрайтов.

Благодарности

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 24-29-00166.

5. Литература

- [1] D.D. Sentman and E.M. Wescott, Red sprites and blue jets: Thunderstorm-excited optical emissions in the stratosphere, mesosphere, and ionosphere, *Physics of Plasmas*, vol. **2**, 2514, 1995; doi: 10.1063/1.871213
- [2] H.C. Stenbaek-Nielsen, R. Haaland, M.G. McHarg, et al, Sprite initiation altitude measured by triangulation, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. **115**, 2010; doi: 10.1029/2009JA014850
- [3] C.J. Rodger, Red sprites, upward lightning, and VLF perturbations, *Reviews of Geophysics*, vol. **37**, 317, 1999; doi: 10.1029/1999RG900006
- [4] A. Jehl, T. Farges and E. Blanc, Color pictures of sprites from non-dedicated observation on board the International Space Station, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. **118**, 454, 2013; doi: 10.1029/2012JA018144
- [5] R.C. Franz, R.J. Nemzek, and J.R. Winckler, Television Image of a Large Upward Electrical Discharge Above a Thunderstorm System, *Science*, vol. **249**, 48, 1990; doi: 10.1126/science.249.4964.48
- [6] O.H. Vaughan Jr., R. Blakeslee, W.L. Broeck, B. Vonnegut, M. Brook, and J. McKune Jr., A cloud-to-space lightning as recorded by the space shuttle payload bay camera, *Mon. Weather Rev.*, vol. **35**, 1459, 1992; doi: 10.1175/1520-0493(1992)120<1459:ACTSLA>2.0.CO;2
- [7] D. D. Sentman, and E. M. Wescott, Observations of atmospheric optical flashes recorded from an aircraft, *Geophys. Res.*, vol. **20**, 2857, 1993; doi: 10.1029/93GL02998
- [8] M.G. McHarg, H.C. Stenbaek-Nielsen, T. Kammer, Observed emission rates in sprite streamer heads, *Geophys. Res. Lett.*, vol. **34**, 2007; doi: 10.1029/2007GL029881
- [9] V. Tarasenko, N. Vinogradov, E. Baksht, D. Sorokin, Ionization Waves, Propagating in Opposite Directions, as in Red Sprites, *Journal of Atmospheric Science Research*, vol. **3**(6), 42, 2022; doi: 10.24018/ejgeo.2022.3.6.322
- [10] R. Williams, Sprites, elves and glow discharge tubes, *Physics Today*, vol. **54**(11), 41, 2001;

doi: 10.1063/1.1428435

- [11] Y. Goto, Y. Ohba, and K. Narita, Optical and spectral characteristics of low pressure air discharges as sprite models, *Journal of Atmospheric Electricity*, vol. **27**, 105, 2007; doi: 10.1541/jae.27.105
- [12] A. Robledo-Martinez, A. Garcia-Villarreal, and H. Sobral, Comparison between low-pressure laboratory discharges and atmospheric sprites, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. **122**, 948, 2017; doi: 10.1002/2016JA023519
- [13] В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, В.А. Панарин, Н.П. Виноградов, Стримеры, инициируемые ёмкостным разрядом при давлениях воздуха 0.2–6 Торр, *Физика плазмы*, vol. **49**, 590, 2013; doi: 10.31857/S0367292123700245
- [14] Д.А. Сорокин, М.И. Ломаев, Т.И. Банюкина, В.Ф. Тарасенко, Определение плотности и температуры электронов, а также приведенной напряженности электрического поля в плазме высоковольтного наносекундного разряда в азоте атмосферного давления, инициируемого пучком убегающих электронов, *Журнал технической физики*, vol. **84**, (8), 13–20, 2014.