

## ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

1. Аннотация Интерес к явлениям, протекающим в сверхсильных электрических полях в газовом разряде, обусловлен необычными свойствами открытых форм разряда, новыми эффектами, возникающих при значительных перенапряжениях разрядного промежутка, превышающих стационарные пробойные до трёх порядков величины, и реализацией на этой основе нового класса приборов, генерирующих мощные импульсы с субнаносекундными и пикосекундными фронтами нарастания при высоких – десятки килогерц частотах следования, и устройств, в которых используются эти появившиеся (новые) возможности для воздействия на различные объекты. В проекте проведены теоретические и экспериментальные исследования высокоэнергетических явлений нано и субнаносекундной длительности в сверхсильных электрических полях в особой форме разряда – «открытом» разряде (высоковольтный газовый разряд в малых разрядных промежутках с сетчатым электродом) в гелии, неоне и аргоне в диапазоне давлений от единиц Торр до атмосферного при напряжении до 200кВ и частоте следования импульсов – десятки кГц.

### 2. Тема работы

Исследование высокоэнергетических явлений нано и субнаносекундной длительности в сверхсильных электрических полях в газовом разряде.

### 3. Состав коллектива

1. Бохан Петр Артемович, д.ф-м.н., главный научный сотрудник, ИФП СО РАН, трудовой договор
2. Швейгерт Ирина Вячеславовна, д.ф-м.н., ведущий научный сотрудник, ИТПМ СО РАН, трудовой договор
3. Александров Андрей Леонидович, к.ф-м.н., старший научный сотрудник, ИТПМ СО РАН, трудовой договор
4. Бельская Екатерина Викторовна, 36 лет, к. ф-м.н., научный сотрудник, ИФП СО РАН, трудовой договор
5. Гугин Павел Павлович, 33 года, младший научный сотрудник, ИФП СО РАН, трудовой договор
6. Лаврухин Максим Александрович, 30 лет, младший научный сотрудник, ИФП СО РАН, трудовой договор
7. Ким Владимир Анатольевич, ведущий инженер, ИФП СО РАН, трудовой договор
8. Вагапов Сергей Анатольевич, 21 год, студент Новосибирского Государственного Университета, трудовой договор
9. Гугнин Андрей Александрович, 22 года, студент Новосибирского Государственного Технического Университета, трудовой договор
10. Елак Елена Васильевна, 21 год, студентка Новосибирского Государственного Технического Университета, трудовой договор

#### 4. Информация о гранте

Исследование высокоэнергетических явлений нано и субнаносекундной длительности в сверхсильных электрических полях в газовом разряде.  
руководителя \_\_\_\_\_ проекта:

Бохан Петр Артемович

Швейгерт Ирина Вячеславовна, ответственный исполнитель

#### 5. Научное содержание работы

##### 5.1. Постановка задачи

Построение физической модели функционирования (развитие, горение, рекомбинация плазмы в межимпульсный период) «открытого» разряда в гелии при сверхвысоких напряженностях (до  $10^6$  В/см) электрического поля; Проведение самосогласованного кинетического моделирования импульсного высоковольтного «открытого» разряда в гелии для различных давлений газа (от единиц Торр до атмосферного давления) и напряжений (до 200 кВ) с целью исследования влияния различных механизмов эмиссии электронов (под действием резонансных ВУФ фотонов, рентгеновского излучения, быстрых нейтральных частиц, ионов и вторичных электронов) на развитие тока разряда в момент пробоя разрядного промежутка в этих условиях; Проведение самосогласованного кинетического моделирования развития и функционирования комбинированного разряда – «открытый» разряд + капиллярный разряд; Проведение самосогласованного кинетического моделирование явления убегания быстрых электронов и развития волн ионизации в ограниченном по сечению разрядном объеме с целью исследования процессов и механизмов развития тока и задержки пробоя; Проведение самосогласованного кинетического моделирования распада плазмы – процесса нейтрализации проводящего состояния в межимпульсном интервале в комбинированном разряде – «открытый» разряд + капиллярный разряд;

##### 5.2. Современное состояние проблемы

В последнее десятилетие нарастает интерес к исследованиям физики быстропротекающих процессов в газовых разрядах при больших перенапряжениях электрического поля в разрядном промежутке большой. Работы по исследованию физических процессов, генерированию нано и пикосекундных импульсов, физике убегających электронов были начаты в СССР в 70 годы прошлого века. В настоящее время они продолжают развиваться при доминировании российских специалистов в работах сотрудников Российского Федерального Ядерного Центра - ВНИИЭФ, Физического Института РАН, Института Сильноточной Электроники СО РАН, Томского Государственного Университета, Института Электрофизики УрО РАН и т.д. [см, например, Гуревич А.В., ЖЭТФ, Т.39, 1296 (1960); Бабич Л.П. и др., УФН, Т.160, 49 (1990); Korolev Yu.D. et al., "Physics of pulsed breakdown in gases", Ekaterinburg, 1998; Яландин М.И. и др., ПТЭ, №3, 5 (2001); Ткачев А.Н. и др., Письма в ЖЭТФ, Т.77, 264 (2003); Babich L.P., "High-energy phenomena in electric discharges in dense gases: theory, experiment and natural phenomena". Futurepast Inc., USA, 2003; Тарасенко В.Ф. и

др., УФН, Т.174, 952 (2004); Месяц Г.А. и др. УФН, Т.175, 225 (2005); «Runaway Electron Beams and Discharges Based on Background Electron Multiplication Wave in Dense Gases», Ed. by S.I. Yakovlenko, Proc. of Prokhorov Inst. of General Physics, V.63 (2007); Королев Ю.Д. и др., Физика плазмы, Т.34, 1104 (2008); Бабич Л.П. и др., ДАН, Т.429(1), 35 (2009); Тарасенко В.Ф., Физика плазмы, Т.37, 444 (2011); Известия ВУЗов. Физика. Т.59 (7-2), 23 (2016); Naidis G.V., et al. Plasma Sources Sci. Technol. V.27, 013001 (2018) и многие другие]. В настоящее время интерес к этой теме проявлен в Китае [Shao T. et al., J. Appl. Phys. V.109, 083306 (2011)], Израиля [Yatom S. et al., J. Appl. Phys. V.109, 073312 (2011); Levko D. et al., J. Appl. Phys. V.111, 013303 (2011); Yatom S., et al. Appl. Phys. Lett. V.100, 024101 (2012); Levko D., et al., Intern. Review of Physics, V.6(2), 165 (2012); Levko D., et al., Appl. Phys. Lett. V.100, 84105 (2012) и др.].

### 5.3. Полученные результаты

Разработана физическая и математическая модели пробоя в разряде высокого давления (100-760 Торр) и при напряжениях 100 -200 кВ в гелии. Модель включает уравнения Болцмана для функции распределения электронов, ионов и быстрых атомов, которые решаются самосогласованно с уравнением Пуассона. Кинетика электронов в гелии при высоких давлениях включает образование молекулярных ионов, дополнительные реакции ионизации, таких как ионизация Пеннинга при столкновении возбужденных атомов. Кроме того учитывается диссоциативная рекомбинация ( $\beta_2 = 10^{-7} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ ) и трехчастичная рекомбинация ( $\beta_3 = 10^{-19} \text{ cm}^{-6}\text{s}^{-1}$ ). Кинетическое моделирование проводилось с использованием метода частиц в ячейках с розыгрышем столкновений методом Монте Карло, что позволяет аккуратно моделировать движение электронов эмитированных с катода в режиме убегания. Отметим, что гидродинамический подход для решения данной задачи не учитывает нелокальную зависимость энергии электронов для больших  $E/N$  и дает заниженные величины скорости ионизации и скорости нарастания тока со временем.

Разряд зажигается между двумя катодами расположенными на расстоянии 6 мм и анодной сеткой посередине. Прозрачность анодной сетки составляет 97%. Напряжение подается одновременно на оба катода. В расчетах рассматривались два случая нарастания тока до максимального значения 100 кВ в течение 10 нс и 100 нс.

На рис.1 показано нарастание полного тока разряда при пробое в гелии для двух значений нарастания тока до максимального значения, 10 нс и 100 нс, а также токи вторичных электронов с поверхности катода за счет фотоэмиссии и при бомбардировке ионами и быстрыми нейтральными атомами. Фотоны с доплеровским сдвигом по частоте образуются при соударении быстрых атомов/ионов с атомами возбужденными электронным ударом. Предполагается, что фотоны с доплеровским сдвигом по частоте распространяются в объеме плазмы как вакууме, без перепоглащения, тогда как резонансные фотоны без сдвига по частоте перепоглащаются и на характерных временах пробоя заперты в оптически плотной плазме. Коэффициенты вторичной эмиссии

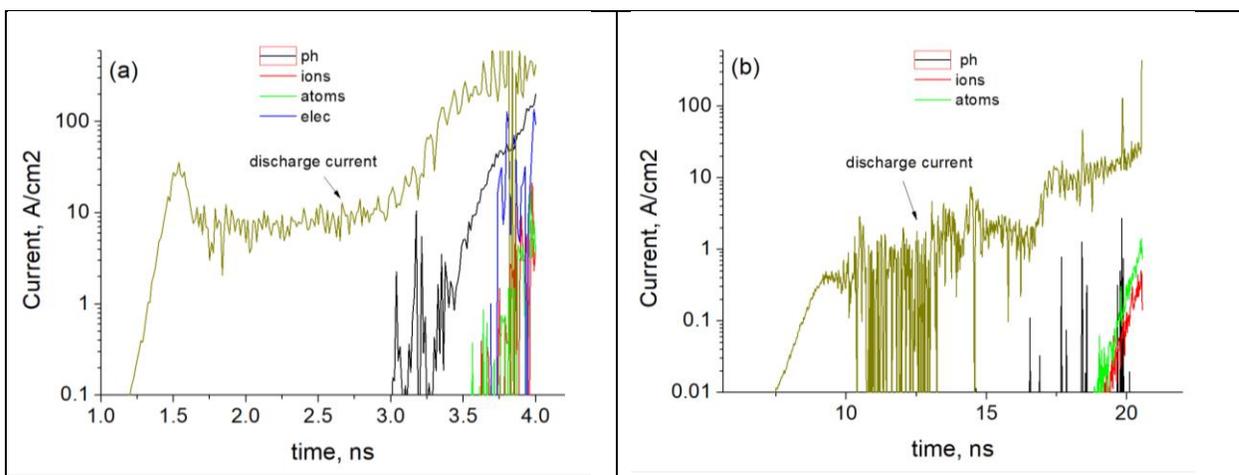


Рис. 1 Ток разряда и токи электронов с катода за счет фотоэмиссии, ионов, быстрых атомов и электронов для двух времен нарастания фронта напряжения на катоде  $t=10$  нс (а) и  $100$  нс (в),  $P=100$  Торр,  $U=100$  кВ.

электронов являются функциями энергии ионов и быстрых атомов. Результаты расчетов показали, что при высоких давлениях газа меняется доминантный механизм вторичной эмиссии с катода. Если при пониженных давлениях,  $P=10$  Торр нарастание тока на начальной этапе определялось потоком фотонов с доплеровским сдвигом по частоте, то при повышенном давлении  $P=100$  Торр эмиссия электронов задается быстрыми атомами и ионами. Отметим, на начальном этапе ток разряда нарастает без участия эмиссии электронов с катода. Кинетическое моделирование пробоя проводилось в одномерном приближении, для плазменного ключа с двумя плоскими катодами и анодной сеткой между ними. На катоды одновременно подается напряжение  $100$  кВ с синусоидальным фронтом нарастания до максимальной амплитуды  $10-100$  нс. Давление газа гелия  $100$  Торр. Динамика развития пробоя в модельном комбинированном разряде для  $11$  кВ и  $P=10$  Торр показана на рис. 2

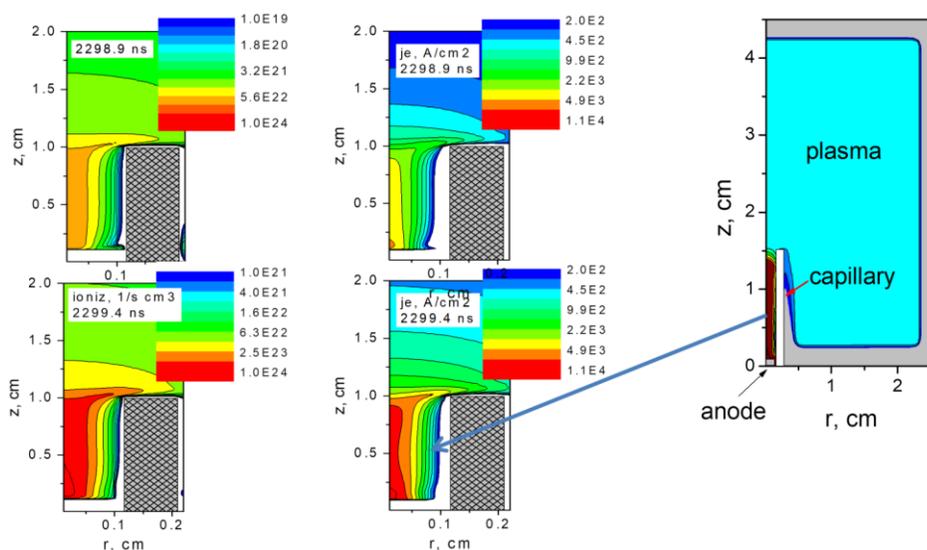


Рис. 2. Изменение скорости ионизации (в единицах  $\text{сек}^{-1}\text{см}^{-3}$ ) и плотности тока (в единицах  $\text{Асм}^{-2}$ ) в капилляре с радиусом 0.1 см за 500 пикосекунд развития пробоя в капилляре,  $U=11$  кВ и  $P=10$  Торр.

Время задержка пробоя в капилляре в случае  $U=11$  кВ и  $P=10$  Торр примерно равна 2,3 мкс при начальной концентрации плазмы в капилляре  $10^9 \text{ см}^{-3}$ , что соответствует режиму с низкой частотой импульсов. Сначала ток на анод медленно увеличивается и в течение последних 500 пикосекунд экспоненциально возрастает до величины примерно 30 А.

#### 6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Кинетическое моделирование проводимое с использованием ресурсов ИВЦ НГУ является значимой частью выполнения проекта, поскольку, позволяет интерпретировать экспериментальные данные и планировать постановку следующих экспериментов. Использование многопроцессорных суперкомпьютеров является обязательным условием выполнения работ по проекту.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы за 2020 г.

1. P A Bokhan, P P Gugin, M A Lavrukhin, D E Zakrevsky, I V Schweigert and A L Alexandrov, Investigation of the characteristics and mechanism of subnanosecond switching of a new type of plasma switches. I. Devices with counter-propagating electron beams—kivotrons. 2020 Plasma Sources Sci. Technol. 29 084002 <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab9d90>, Impact factor : 3.19 Q1
2. P A Bokhan, E V Belskaya, P P Gugin, M A Lavrukhin, D E Zakrevsky and I V Schweigert, Investigation of the characteristics and mechanism of subnanosecond switching of a new type of plasmas switches. II switching devices based on a combination of 'open' and capillary discharges—eptrons, 2020 Plasma Sources Sci. Technol. 29 084001 <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab9d91> Impact factor : 3.19 Q1
3. Olga Troitskaya, Ekaterina Golubitskaya, Mikhail Biryukov, Mikhail Varlamov, Pavel Gugin, Elena Milakhina, Vladimir Richter, Irina Schweigert, Dmitry Zakrevsky and Olga Koval Non-thermal plasma application in tumor-bearing mice induces increase of serum HMGB1. International Journal of Molecular Sciences, International Journal of Molecular Sciences, 19 Jul 2020, 21(14) 2020 Impact factor 4.183 Q1