УДК 537.52, 533.933, 53.08

К.В. Шпаков, А.В. Огинов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН России

119991, Москва, Ленинский проспект, 53

e-mail: shpakov@lebedev.ru

**СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НАНОСЕКУНДНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЯДОВ**

Описана система регистрации оптического излучения с наносекундным разре­ше­нием, собранная в лаборатории физического института им. П.Н. Лебедева. Приведены характеристики системы, а также выявленные в ходе экспери­ментов недостатки этого первого прототипа. Приведены описание и результаты проведенных экспериментов по исследованию начальной фазы протяженного высоковольтного атмосферного разряда с применением этой диагностики.

**Ключевые слова**: атмосферный разряд, система регистрации, развитие разряда.

**Введение**

В настоящее время в разных лабо­ра­то­риях по всему миру [1, 2] ведутся активные исследования начальной стадии раз­вития протяженного искрового разряда. При­родное явление протяженного разря­да – молнии, возникает при напряженнос­ти поля на порядок меньше порогового поля классического пробоя. Рассматри­вают­ся разные механизмы возникновения пробоя, одним из которых является так называемый пробой на убегающих электро­нах [3]. Излучения в рентгеновском и УФ диапазонах, которые сопровождают процесс ускорения электро­нов, при деталь­ном изучении могут дать немало полезной инфор­мации о протекаю­щих на предпробой­ной стадии процессах. Для этих целей в нашей лаборатории была собрана система регистрации излучения оптического и УФ диапазонов с нано­секундным разрешением. Система пред­став­ляет собой совокупность диагностик, собранных на базе фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и электронно-оптических преобразователей (ЭОП).

**Описание системы регистрации**

Диагностика на базе ФЭУ представ­ляет собой четыре независимых датчика (схематически датчик представлен на рис. 1) со сходными параметрами. Она предназна­чена для обнаружения излучения (в видимом и ближнем УФ диапазонах) как такового, определения времени его возникно­вения, а также получения данных о характере изменения интенсивности этого излучения со временем. За счет большого набора оптических фильтров имеется возможность работать с узкими поддиапазонами спектра, лежащими внут­ри диапазона чувствительности диагности­ки, который составляет 240–600 нм. Временное разрешение этой диагностики составляет около 5 нс. К выходному окну датчика может быть присоединен коллиматор, позволяющий сузить область

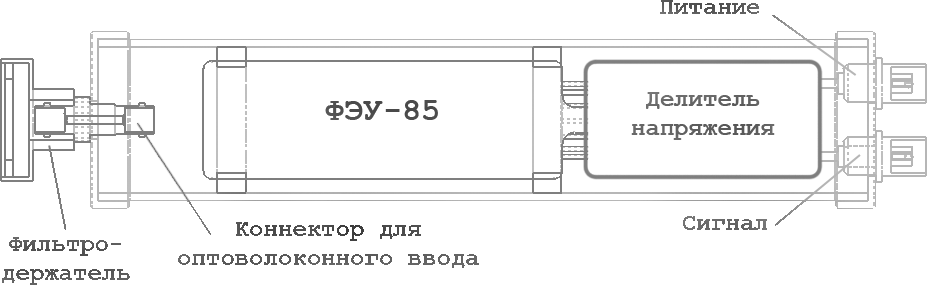


Рис. 1. Датчик оптического излучения на базе ФЭУ. Диапазон чувствительности 240–600 нм.

регистрации прибора до кружка диаметром 2.5 мм, расположенного на расстоянии объекта исследования.

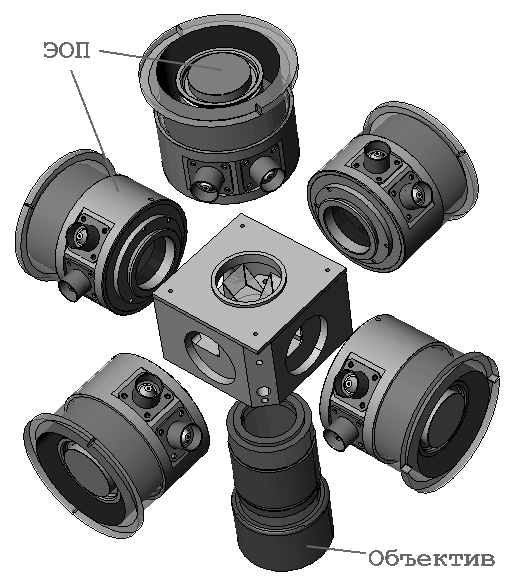


Рис. 2. Схема пятиканальной системы скоростной оптической съемки.

Диагностика на базе ЭОПов (рис. 2) представляет собой пятиканальную систе­му скоростной оптической съемки (в видимом диапазоне длин волн) с временным ~7 нс и пространственным ~5 мм разрешениями и с полем зрения диамет­ром 0.45 м в плоскости объекта наблюдения. Изображение проецируется центральным объективом, расположенным на главной оптической оси всей системы, на систему призм, расположенных в фокаль­ной плоскости этого объектива, где оно разделяется на пять частей и впоследст­вии попадает одновременно на пять ЭОПов. Без дополнительных преломле­ний и отражений сформирован­ное изображение поступает на канал № 5 (осевой канал). На остальные же каналы, развернутые под углом 90° по отношению к главной оси и друг к другу, приходит оптическое излучение, содержащее инфор­мацию о, приблизительно, трети (по площа­ди) исходного поля зрения в плоскости объекта (см. рис. 3).

В этой пятиканальной системе исполь­зуются двухэлектродные ЭОПы перво­го поколения в качестве управ­ляемых затворов и усилителей оптическо­го сигнала (с относительно небольшим

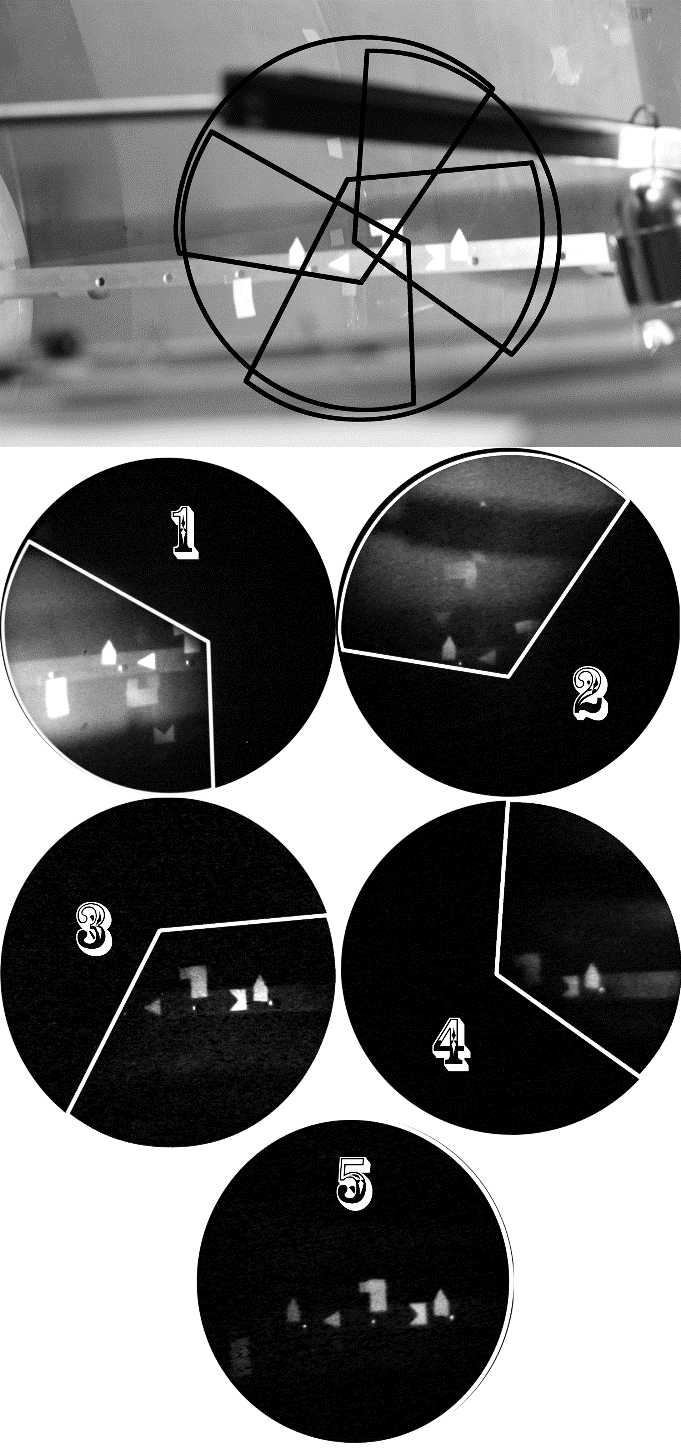


Рис. 3. Схема деления исходного изображения по каналам на примере съемки тестового объекта в непрерывном режиме работы ЭОПов.

усилением G~200). Входные и выходные окна ЭОПов выполнены на базе воло­конно-оптических пластин, диаметр рабо­че­го поля фотокатода равен 27 мм. Компоновка системы позволяет работать как в импульсном режиме (до пяти каналов), так и в непрерывном режиме, в обход кабельного генератора (в этом режиме могу работать одновременно до четырех каналов). В импульсном режиме управление открытием электронно-опти­ческих затворов путем подачи осу­ществляется коротких (по времени)

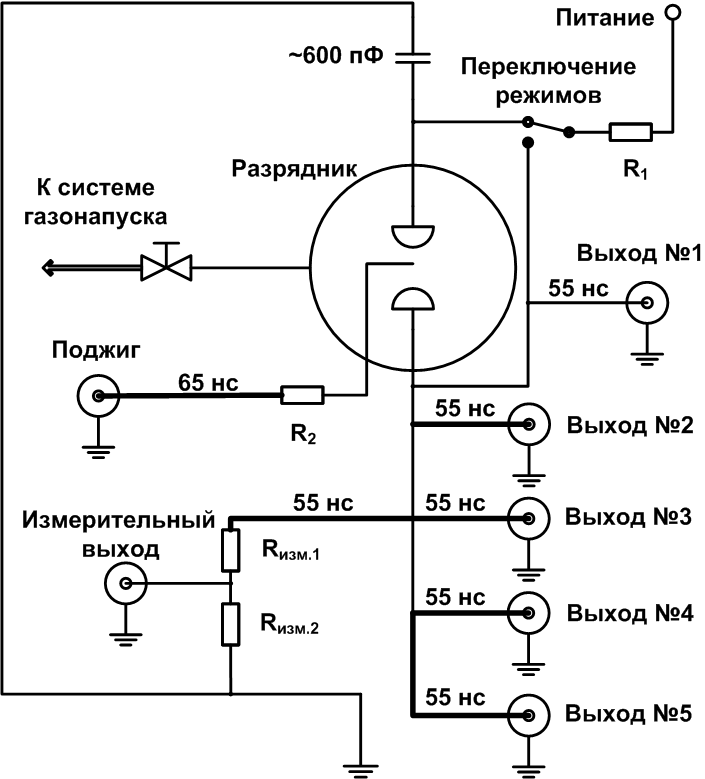


Рис. 4. Схема кабельного генератора, генерирующего управляющий импульс для откры­вания электронно-оптического затвора в нужный момент времени.

высоковольтных импульсов (диапазон напряжения импульса 12–16 кВ) с много­канального кабельного генератора (рис. 4). ЭОПы коммутируются с генератором кабелями разной длины, подобранной таким образом, чтобы напряжение на каждом ЭОПе появлялось в определенный момент времени после срабатывания разрядника. В непрерывном режиме напряжение питания ЭОПов составляет всего 2–4 кВ. Разрешение по объекту, находящемуся на расстоянии 2.2 м от торца центрального объектива системы, при съемке в непрерывном режиме состав­ляет около 2 мм. При работе ЭОПа в импульсном режиме, разрешение падает до прибли­зительно 5 мм. Для съемки изображе­ния с выходного окна ЭОПа (торца волоконно-оптической пластины) приме­няются цифровые фотокамеры, которые снабжены светосильными (D/F=1:1.8) макрообъективами для мини­ми­зации потерь яркости сигнала.

На рис. 3 на снимках с каналов № 1 и 2 видно наложение повернутой на 90° и зеркально отображенной тусклой копии изображения на более яркое действитель­ное изображение канала. Это связано с паразитными отражениями на гранях оптических призм и происходит при относительно высокой яркости посту­пающего изображения. При съемке относи­тельно слабого излучения, возни­кающе­го на начальных стадиях развития протяженного искрового разряда (до непосредствен­но пробоя), подобных наложе­ний замечено не было. Также стоит отметить существенную разность в яркос­ти используемых ЭОПов. Яркость можно уве­ли­чить, подняв напряжение в пи­тающем импульсе, однако это невозможно сделать независимо для каждого канала в данной конфигурации системы. В результате ограничение на максимальное зна­чение напряжения питания накла­дывается самым ярким ЭОПом (канал №1). Такое положение дел немного затрудняет анализ получаемых результатов, однако в настоящее время ведутся работы по модернизации данной системы с учетом выше перечисленных недостатков.

**Результаты и обсуждение**

Эксперименты проводились на уста­новке ЭРГ в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (г. Москва). Установка адаптирована под вывод высокого напряжения на воздух [4]. Амплитуда напряжения в импульсе в проведенных экспериментах достигала 1.2 МВ, а время нарастания напряжения от 100 кВ до 1.1 МВ составляло около 200 нс. Во всех проведенных экспериментах разряд­ный промежуток составлял 600 мм.

Вначале было проведено две серии экспе­риментов по регистрации оптического излучения диагностикой на базе ФЭУ. Целью первой серии экспериментов было обнаружение излучения, возникающего на ранних стадиях развития высоковольтного протяженного искрового разряда, и определение его приблизительного спект­раль­ного состава. Для этого исполь­зо­вались четыре датчика, на которые были установлены разные оптические фильтры. За счет изменения набора фильтров удалось определить приблизительный диапазон длин волн, в котором лежит излучение, возникающее в разрядном промежутке на стадии нарастания напряжения. Стоит сразу отметить, что это излучение принадлежит ультрафиолетовой области спектра (диапазон длин волн приблизительно 240*–*330 нм).

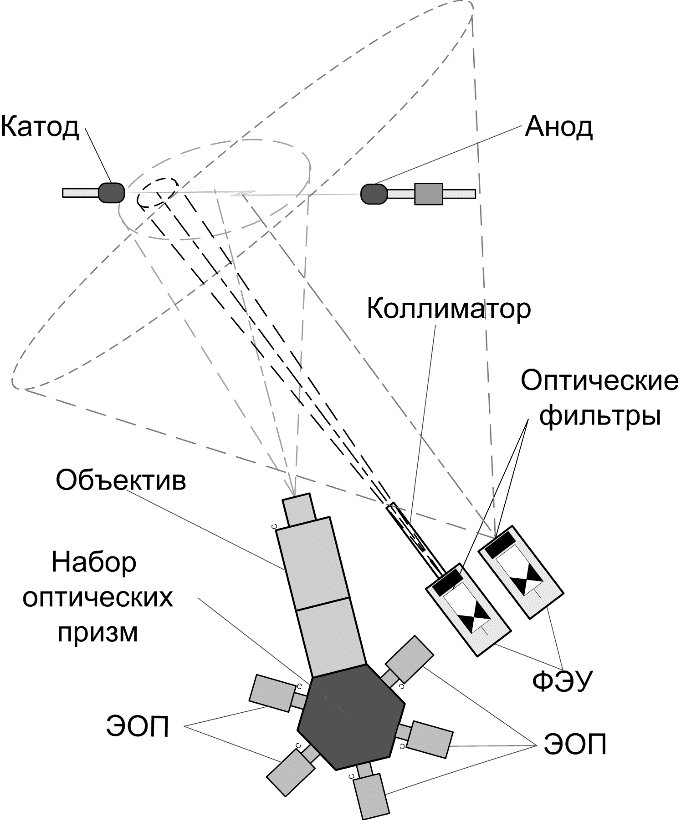


Рис. 5. Схема расположения диагностик в проведенных экспериментах.

Целью второй серии экспериментов было определение области возникновения этого УФ излучения в межэлектродном пространстве. Для этого использовались два датчика, на которые были установлены одинаковые оптические фильтры: один с коллиматором, один без (рис. 5).

Из осциллограмм (рис. 6) видно, что раньше по времени возникает излучение с более короткой длинной волны. Излу­чение, соответствующее ближней ультра­фиолетовой области спектра (240–400 нм,– на границе чувствительности диагности­ки), возникает на стадии нарастания напряжения на катоде. Из рис. 6 видно, что в момент возникновения этого излучения скорость нарастания напряжения начинает падать. Когда интенсивность упомянутого излучения начинает спадать, то скорость нарастания напряжения на катоде возрастает.

На рис. 7 представлены результаты второй серии экспериментов. Самый ранний импульс УФ излучения (диапазон 240–400 нм) возникает в прикатодной области. Было проведено множество

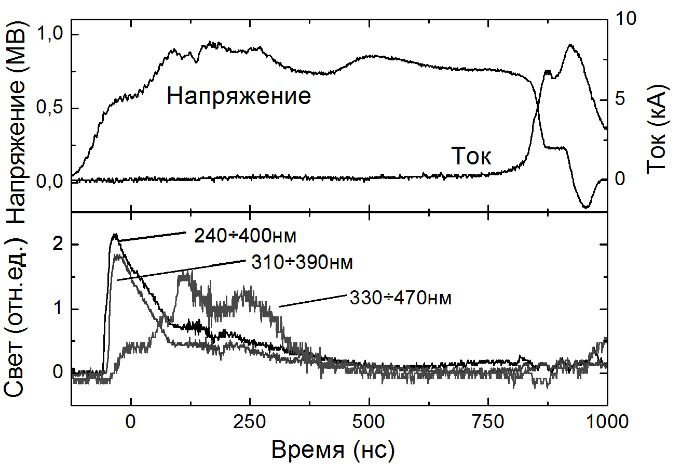


Рис. 6. Результаты регистрации оптического излучения разных диапазонов длин волн.

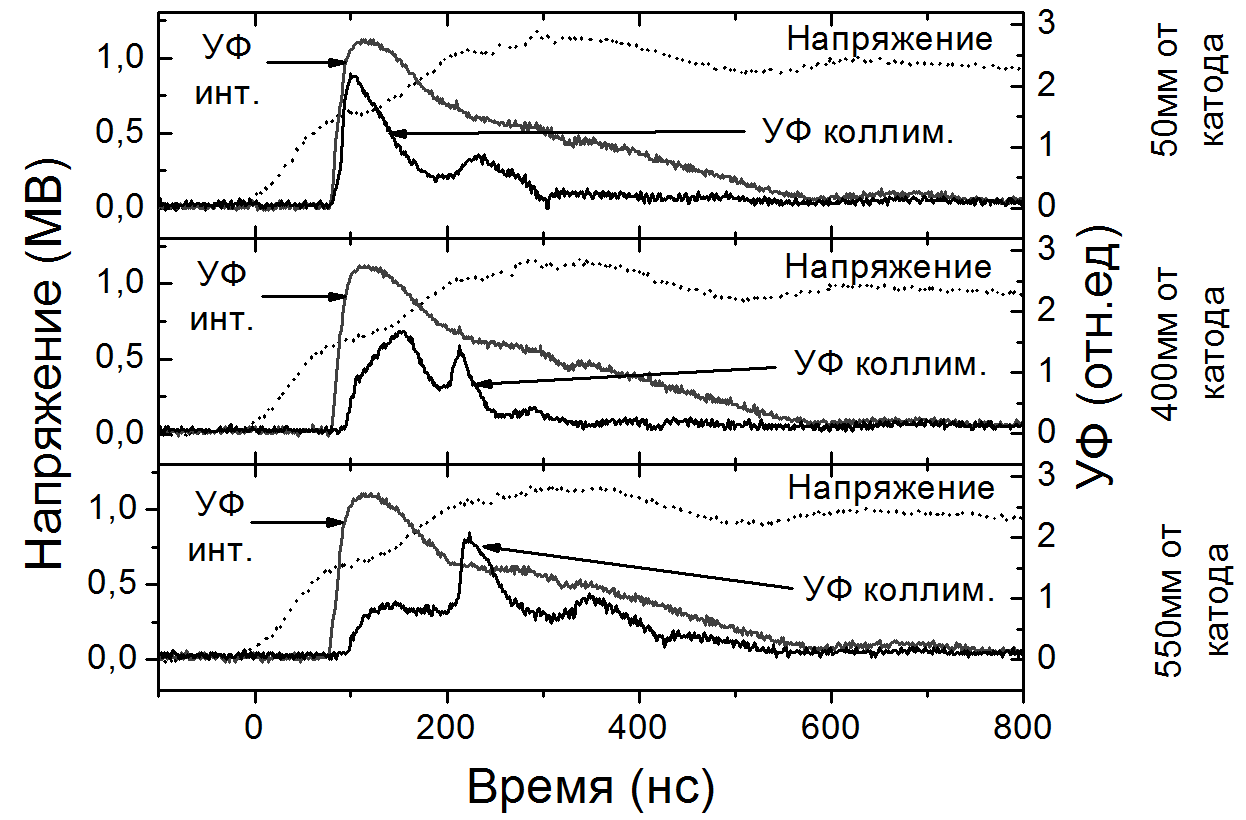


Рис. 7. Результаты проведенных экспериментов по обнаружению области генерации УФ излучения на начальных стадиях развития протяженного высоковольтного искрового разряда.

экспериментов, в каждом из которых менялось положение датчика, снабженного коллиматором. Эксперименты показали, что при удалении от катода в сторону анода излучение в той области, которую “видит” датчик, возникает позже по време­ни, а амплитуда сигнала уменьшается. При этом при приближении к аноду, на некотором расстоянии от него появляется второй максимум УФ излучения, фронт нарастания (точка фронта на полувысоте) которого отстоит от фронта первого на 100–120 нс. При этом данные интеграль­ной съемки развития разряда с прину­дительным выключением электрического поля [5] говорят о том, что первыми появляются стримеры именно с катода, а через 100–150 нс можно заметить анодные стримеры. Также следует отметить, что УФ излучение (интегральное со всего разряд­ного промежутка) регистрируется через 80 нс после начала подъема напряжения на зазоре (само напряжение на ка­тоде в этот момент составляет 580–600 кВ), а первые различимые стримеры видны через 90–150 нс после фронта УФ.

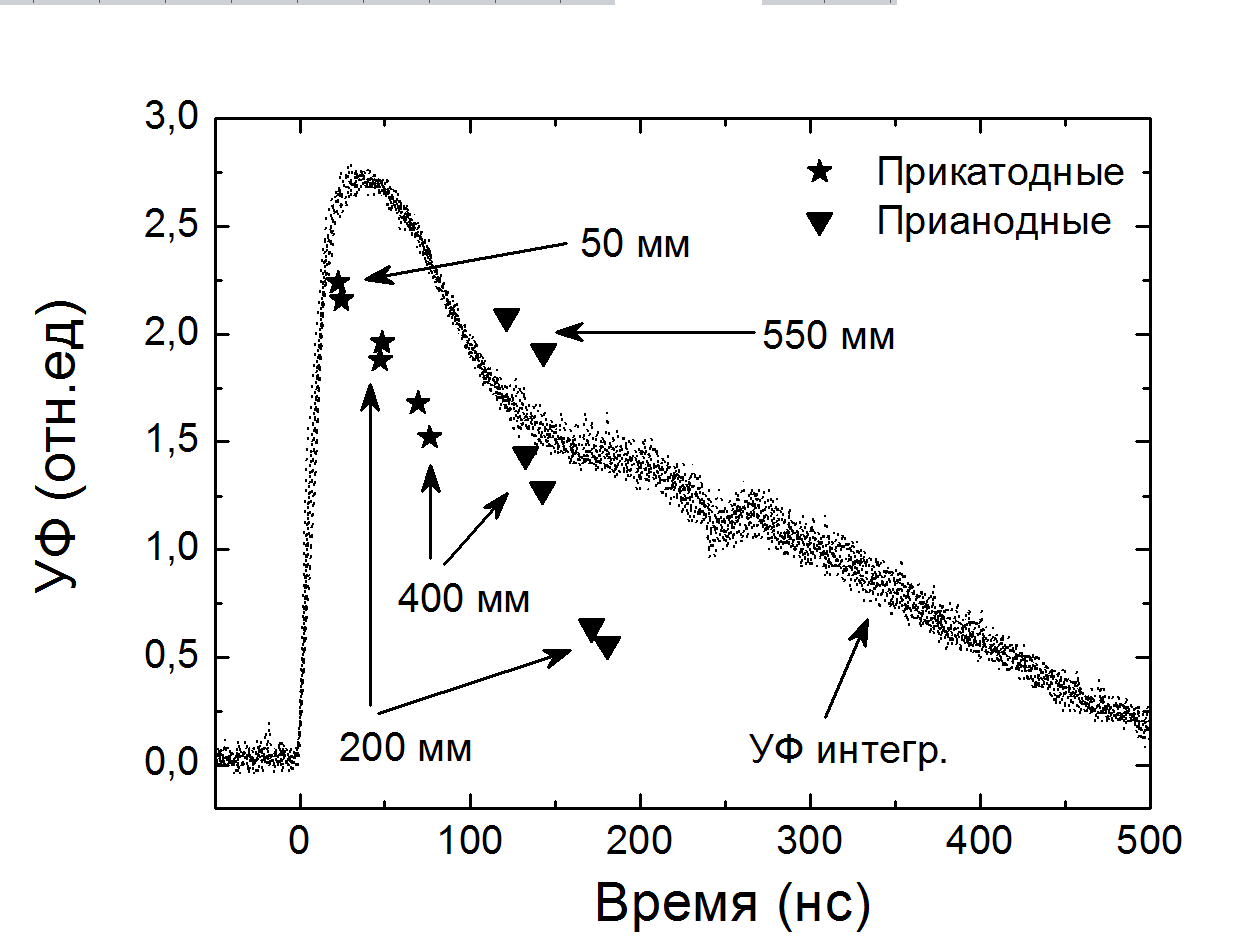


Рис. 8. Пики УФ излучения, зарегистрированного в разных “выстрелах” коллимированным датчиком на разных расстояниях от катода. Звездочками показаны пики УФ излучения, область генерации которого перемещается со временем в сторону от катода, треугольниками – в сторону от анода.

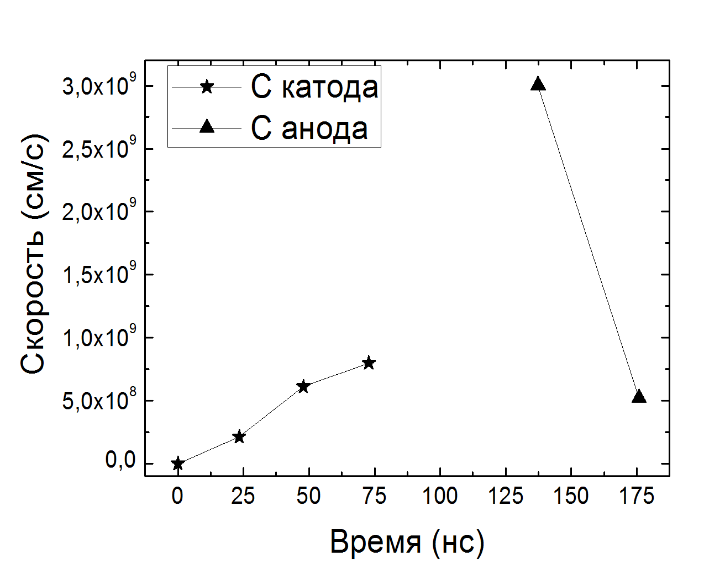


Рис. 9. Оценка скоростей перемещения областей генерации УФ излучения.

На рис. 8 наглядно показаны положения максимумов УФ по времени и их амплитуда при регистрации на разных расстояниях от катода. Сигналы, отно­сящиеся к свечению прикатодной и прианодной области, показаны отдельно. За точку отсчета по времени взят передний фронт интегрального УФ. При ре­гистра­ции УФ на расстоянии 550 мм от катода (50 мм от анода) сигнал с ФЭУ, снабженного коллиматором, превышает интегральный сигнал. Это связанно с небольшим различием параметров исполь­зо­ванных ФЭУ (около 20 %). На рис. 9 приведены оценки линейных скоростей перемещения прикатодной и прианодной областей генерации УФ излучения в каждый конкретный момент времени развития разряда. За точку отсчета по времени взят передний фронт интеграль­ного УФ. По данным расчетам скорости роста стримеров (если считать, что источником УФ излучения является головка стримера) как минимум на порядок превосходят значения полученные в ходе оценок результатов интегральной съемки с принудительным отключением электрического поля [5]. Скорости катодных стримеров составляют от 2·108 см/с через 100 нс после начала подъема напряжения на зазоре и за 50 нс увеличивается до 8·108 см/с. Для анодных стримеров начальная скорость составляет 3·109 см/с (стримеры 50 мм в длину) через 220 нс после начала подъема напряжения и падает до 5·108 см/с за 40 нс. Полученные результаты согласуются с теоретическими расчетами [6].

Таким образом, с помощью данной диагностики была обнаружена область генерации излучения диапазона 240–400 нм, а также прослежена его динамика во времени и пространстве.

Также была проведена серия экспериментов, в которых использовалась пятиканальная система скоростной оптической съемки для получения данных о структуре и динамике оптического излучения, возникающего на начальных стадиях развития высоковольтного искрового разряда. Как отмечалось выше, на момент проведения экспериментов система, расположенная как показано на рис. 5, позволяла производить съемку области диаметром 0.45 м. Во всех прове­денных экспериментах межэлектрод­ное расстояние составляло 0.6 м, для обеспечения достаточной длительности процесса. Для исследования была выбрана прикатодная область. Было проведено множество экспериментов, в ходе которых менялось только значение временной задержки между срабатыванием пятиканальной системы и запуском исследуемого процесса.

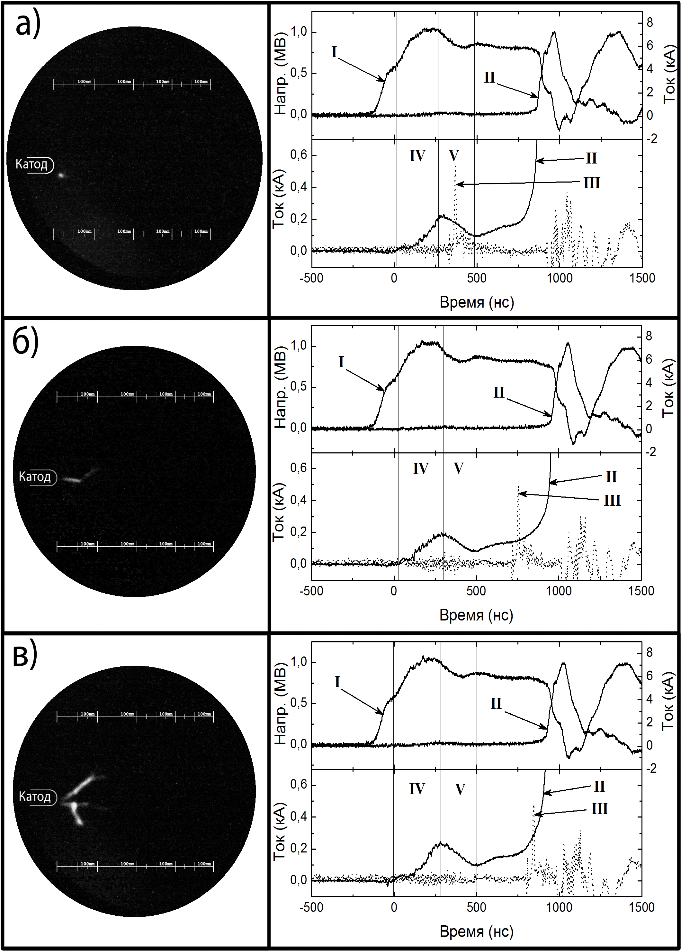


Рис. 10. Снимки разряда, полученные с помощью пятиканальной системы в разных “выстрелах” с осциллограммами.

На рис. 10 приведены кадры, сделанные в раз­ных “выстрелах”. Номерами на осцил­лограм­мах обозначено: I – кривая напря­же­ния; II – кривая тока; III – сигнал, открывающий первый (по порядку) электрон­но-оптический затвор (каждый после­дующий открывается через 10 нс пос­ле предыдущего, длительность экспо­зи­ции каждого составляет приблизительно 7 нс); IV и V -промежутки времени, соответст­вующие нарастанию и спаду предымпульса тока, соответственно. Рис. 9 иллюстрирует, как стримерно-лидерный канал прорастает от катода, при этом “ответная часть” находится за пределами кадра на ранних стадиях развития разряда. Это обусловлено ограниченным полем зре­ния системы, а также более поздним стар­том стримерно-лидерного процесса на аноде. На снимках видно относительно яр­кое свечение уже на спаде предымпульса тока (рис. 10,а). Эксперименты показали, что по мере спада сигнала тока (в интервале между предымпульсом и основным током) свечение, регистри­руемое пятиканальной системой, сначала угасает, а затем на определенном расстоя­нии по времени) от фронта основного

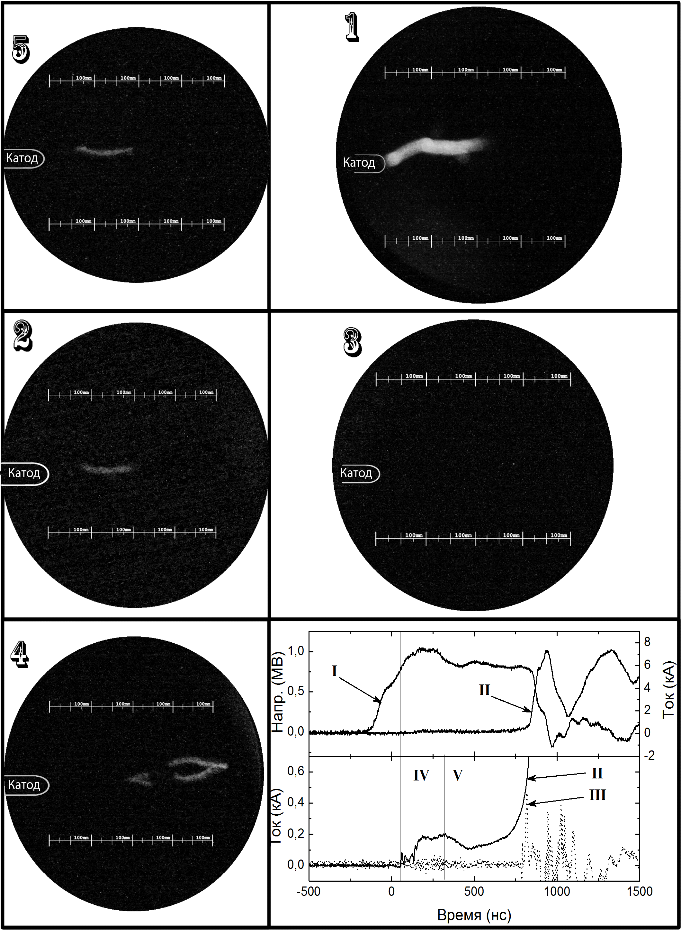


Рис. 11. Снимки разряда, полученные с помощью пятиканальной системы в одном из “выстрелов” с осциллограммами.

тока начинает снова разгораться. Это согла­суется с результатами более ранних экспериментов по регистрации излучения видимого диапазона на установке ЭРГ [5]. На предымпульсе тока область свечения представляет собой округлое пятно (диамет­ром около 20 мм) локализованное на конце катода. Последующий же им­пульс свечения развивается со временем от пятна до длинной ломаной линии, зачастую ветвящейся (рис. 10,в), характер­ной для разряда длинной искры и молнии. На снимках на конце светящегося канала мож­но заметить яркое пятно (головка лидера) и тусклое ответвление (отдельный стри­мер из стримерной зоны, см. рис. 10,б) приблизительно в направлении анода.

На рис. 11 представлены снимки со всех каналов пятиканальной системы, сде­лан­ные в одном “выстреле” экспери­менталь­ной установки. Временная задерж­ка между запусками ЭОПов реализована через кабельные линии фиксированной длины, и в проведенной серии экспери­мен­тов составляла 10 нс между соседними (по номеру) каналами. Причем падение ампли­ту­ды питающего импульса, приходящего на последний канал, относительно первого не превышало 2.5 %. В эксперименте, резуль­таты которого представлены на рис. 11, первым запускался канал №5, через 10 нс канал №1 и далее по порядку. Несмотря на столь малую задержку между каналами на рис. 10 можно увидеть разви­тие стримерно-лидерного процесса. На первом кадре (канал №5) видна очень тусклая линия, отходящая от катода, которая после резкого изгиба становится довольно яркой. На втором кадре (канал №1) видно небольшое ответвление вниз около правого конца светящегося канала. А на последнем кадре (канал №4) видны правый край стримерно-лидерного канала, прорастающего с катода, в форме “<”, и его “ответная часть”, прорастающая с анода. Оба этих ветвящихся канала готовы через несколько десятков наносекунд пересечься и, таким образом, завершить создание горячего проводящего канала и дать дорогу основному току разряда. Таким образом, эти результаты пока­зывают, как небольшое ответвление стримерно-лидерного канала за 50 нс возникло и проросло на приблизительно 50 мм с приблизительной скоростью 109 см/с, что согласуется с результатами регистрации УФ излучения, приведенными выше (см. рис. 8).

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (10-08-01283) и Учебно-Научного Комплекса ФИАН (программа поддержки научной молодежи).*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dwyer J.R., Saleh Z., Rassoul H.K., Concha D. et al. A study of X-ray emission from laboratory sparks in air at atmospheric pressure // J. Geophys. Res. – 2008. – V. 113. – D23207.
2. Rahman M., Cooray V., Ahmad N.A. et al. X rays from 80-cm long sparks in air // Geophys. Res. Lett. – 2008. – V. 35. – L06805.
3. Gurevich A.V., Zybin K.P. // Physics-Uspekhi. – 2001. – V. 44. P. 1119.
4. Огинов А.В., Чайковский С.А., Богаченков В.А. и др. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Тезисы докладов. Москва, 2010. – Том I. – С. 197.
5. Огинов А.В., Чайковский С.А., Богаченков В.А., Шпаков К.В. // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. Москва, 2010, Т.2, С. 92-95.
6. Oreshkin E.V., Chaikovsky S.A., Oginov A.V., Shpakov K.V. // Proc. of 16th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, 2010. – Р. 172‑175.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2011

K.V. Shpakov, A.V. Oginov

P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, 119991 Moscow, Russia, Leninskii ave., 53

e-mail: shpakov@lebedev.ru

**REGISTRATION SYSTEM OF OPTICAL RADIATION WITH NS-SCALE TIME RESOLUTION FOR ATMOSPHERIC DISCHARGE’S INITIAL PHASE INVESTIGATION**

Registration system of optical radiation with ns-scale time resolution constructed in laboratory of P.N. Lebedev Physical Institute was described. Characteristics and also observed during experiments defects of this first prototype of the system were given. Description and results of the carried out experiments of high-voltage atmospheric long discharge initial phase investigation using this diagnostic were given.

**Key words**: atmospheric discharge, registration system, discharge development.

К.В. Шпаков, О.В. Огінов

Фізичний інститут ім. П.Н. Лебедєва РАН, 119991, Москва, Ленінський проспект, 53, Росія

e-mail: shpakov@lebedev.ru

**СИСТЕМА РЕЄСТРАЦІЇ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З НАНОСЕКУНДНИМ РОЗДІЛЕННЯМ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЧАТКОВОЇ ФАЗИ АТМОСФЕРНИХ РОЗРЯДІВ**

Описана система реєстрації оптичного випромінювання з наносекундним розділенням, зібрана в лабораторії фізичного інституту ім. П.Н. Лебедєва. Приведені характеристики системи, а також виявлені в ході експериментів недоліки цього першого прототипу. Приведені опис і результати проведених експериментів з дослідження початкової фази протяжного високовольтного атмосферного розряду з застосуванням даної діагностики.

**Ключові слова**: атмосферний розряд, система реєстрації, розвиток розряду.