

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

2002, том 38, № 5

УДК 535.37 + 778.663

А. П. Бойченко, Н. А. Яковенко
(Краснодар)

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ
ИНТЕГРАЛЬНОГО СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ
СЛАБОТОЧНОГО ЛАВИННОГО РАЗРЯДА
С ДИЭЛЕКТРИКОМ НА ЭЛЕКТРОДЕ

Разработана методика интегральной оценки спектра излучения слабого газоразряда лавинной формы, возбуждаемого в воздухе одиночным импульсом микросекундной длительности в промежутке между электродами, один из которых покрыт фотоматериалом (в качестве диэлектрика). Показано, что при импульсах положительной и отрицательной полярности спектры несколько различаются по интенсивности, особенно на границе фиолетовой и ультрафиолетовой областей. Установлено, что на нее приходится максимум излучения слабого лавинного разряда.

Развитие ионизационных процессов в газовых включениях высоковольтной изоляции [1] или устройствах для реализации газоразрядной фотографии [2, 3] требует знания не только электрических и экспозиционных характеристик слабого лавинного разряда, но также и спектральных. Для этого в настоящее время разработано немало методик и технических средств [4]. Однако все они рассчитаны на исследование спектра излучения разряда, возбуждаемого периодически меняющимся полем высокой напряженности или многократно повторяющимися импульсами, так что разряд при таких условиях может гореть длительное время, достаточное для его спектрального анализа имеющимся стандартным оборудованием (например спектрографами). Проблема возникает при анализе спектра газоразряда (ГР), возбуждаемого одиночными импульсами микросекундной длительности и менее. Разряд в таких условиях имеет небольшую плотность энергии излучения ($\leq 10^{-6}$ Дж/м²) [1–3] и время горения ($\leq 10^{-6}$ с) [5], что затрудняет решение названной задачи стандартным спектральным оборудованием и требует при таких интенсивностях свечения длительной экспозиции фотоматериала (в случае использования спектрографа), не позволяя интерпретировать полученные результаты, соответствующие одиночному импульсу. Поэтому в данной работе поставлена задача разработки методики спектрального анализа излучения разряда при его возбуждении одиночным импульсом микросекундной длительности.

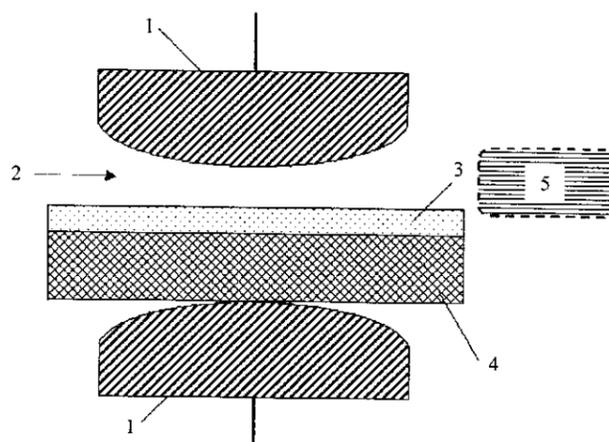


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры

Эксперимент осуществлялся в газоразрядной камере, схема которой представлена на рис. 1. Здесь 1 – электроды Роговского диаметром 50 мм, формирующие однородное электрическое поле в газоразрядном промежутке 2 толщиной $d = 50$ мкм, образованном поверхностями фотоэмульсионного слоя 3 фотоматериала (рентгеновская пленка) и второго электрода. Фотоматериал (представлен в виде двух слоев: фотоэмульсионного и диэлектрической подложки 4) выполнял две функции: использовался в качестве диэлектрика и фотосреды, позволяя одновременно со спектральным анализом разряда вести его фоторегистрацию. На уровне разрядного промежутка и расстоянии 3 мм от него устанавливался кварцевый светоразветвитель (1×20) 5 общей длиной 30 см. Калибровка его спектра пропускания осуществлялась в диапазоне от 260 до 478 нм (о необходимости выбора данного диапазона будет сказано далее) по излучению водородной лампы (в данной области спектра лампа излучает непрерывный спектр [6]), выделяемому интерференционными светофильтрами.

Каждый световод состыковывался с интерференционным светофильтром, максимум спектра пропускания которого согласовывался с максимумом спектральной чувствительности соответствующих фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), работающих в импульсном режиме, что позволило эффективно использовать их светочувствительные свойства. Сигнал от каждого фотоприбора вводился в компьютер через аналого-цифровой преобразователь, и в программе Mathcad-2000 (учитывающей оптические характеристики светоразветвителя, фильтров и ФЭУ) по пиковым значениям кривой затухания свечения разряда за каждым светофильтром строился его спектр излучения.

Во всех вариантах эксперимента использовался воздух с неизменными термодинамическими параметрами, постоянство химического состава которого контролировалось газовым хроматографом типа «Кристалл-5000». Ток воздуха в камеру осуществлялся непрерывно и прекращался за 15 с до зажигания ГР. После завершения газоразрядных процессов его подача возобновлялась, что удаляло из камеры продукты горения ГР. Основные характеристики воздуха, принятые постоянными, представлены в таблице. Следует отметить, что в течение суток отбираемый из окружающей среды воздух менял

Термодинамические параметры и химический состав воздуха

Постоянные термодинамические параметры воздуха			Химический состав воздуха (по данным газового хроматографирования). Объемное содержание, %			
Давление $P \cdot 10^5$ Па	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Относительная влажность $\varphi, \%$	N_2	O_2	CO_2	Остальные газы (суммарное содержание)
$1,013 \pm 0,005$	$20 \pm 0,5$	65 ± 1	77,897	21,006	0,032	1,065

свой концентрационный состав химических элементов. Как правило, наиболее существенные изменения наблюдались для O_2 , CO_2 и H_2O , очевидно, вызываемые сменой климатических условий и дыханием обслуживающего персонала (в то же время в пределах погрешности использованной аппаратуры изменений концентрации N_2 не наблюдалось). Поэтому для поддержания концентрационного состава названных элементов воздуха на уровне значений, представленных в таблице, они дополнительно вводились в него при недостатке и выводились при избытке.

Возбуждение разряда осуществлялось одиночными видеоимпульсами длительностью (на уровне 0,1) ~ 7 мкс. При этом ГР зажигался с запаздыванием на $\sim 4,5$ мкс относительно переднего фронта высоковольтного импульса, а время его горения составляло ~ 1 мкс, что видно по осциллограмме на рис. 2. Напряжение зажигания ГР при импульсах положительной и отрицательной полярности составляло приблизительно 5,4 и 7,3 кВ соответственно. Интегральный ток ГР, усредненный по десяти повторениям опыта, не превышал 25,8 мА для импульсов положительной полярности (относительно электрода, покрытого фотоматериалом) и 74 мА для отрицательной, а фотопленка при каждом повторении эксперимента использовалась только один раз. Полученная на ней сенситограмма ГР говорит о его однородном горении в промежутке, что видно из рис. 3.

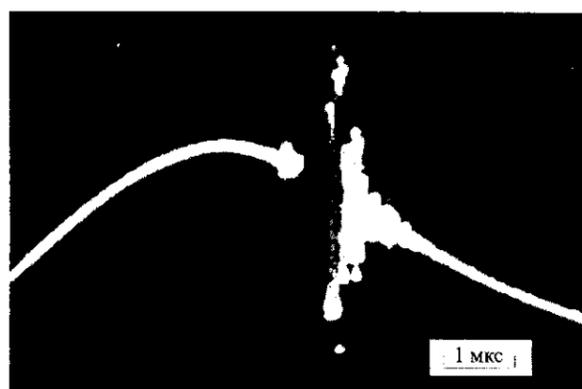


Рис. 2. Осциллограмма пробоя воздуха в промежутке толщиной 50 мкм, образованном фотоэмульсионной стороной фотоматериала и металлическим электродом Роговского (однородное поле) ($Pd = 506,62$ Па·см)

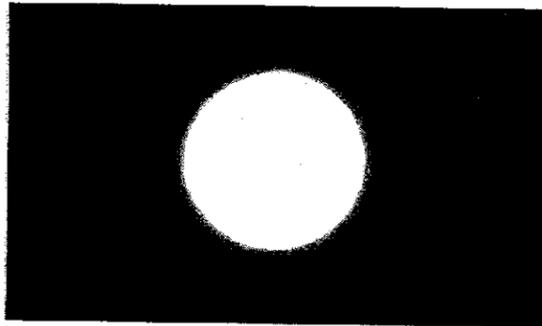


Рис. 3. Сенситограмма лавинного ГР, зафиксированная на галогенсеребряном фотоматериале

Предварительные исследования в видимой области спектра (380–750 нм) показали, что максимум излучения лавинного ГР при импульсах как положительной, так и отрицательной полярности приходится на его коротковолновую область. Поэтому спектр исследовался в диапазоне от 260 до 478 нм. Используемые при этом светофильтры имели следующие максимумы в спектре пропускания (нм): 260, 280, 300, 310, 320, 330, 340, 350, 360, 370, 380, 390, 400, 404, 406, 420, 427, 434, 448, 478. Согласно паспортным данным величина коэффициента пропускания T , усредненная для фильтров на диапазон 260–370 нм, составляла 53,4 %, а на диапазон 380–478 нм – 68,2 %. При этом их спектральная ширина полосы пропускания на уровне $0,5T$ не превышала ± 5 и ± 2 нм соответственно.

На рис. 4 представлен характерный спектр излучения лавинного ГР в воздухе, возбуждаемого одиночными видеоимпульсами положительной 1 и от-

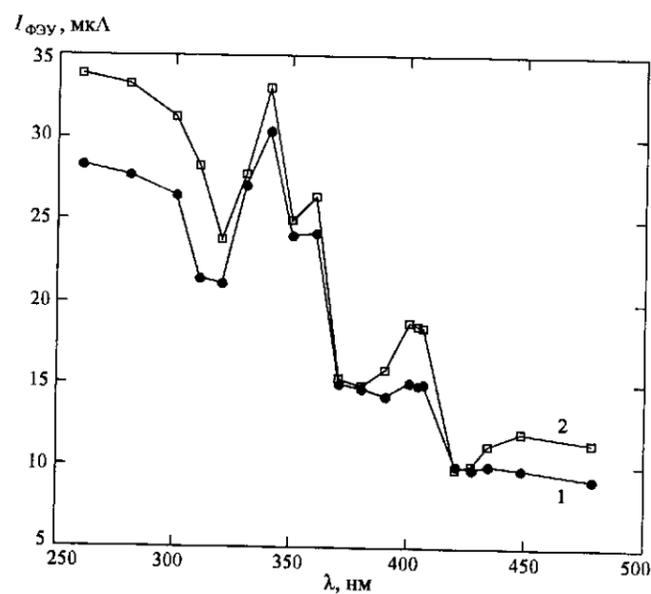


Рис. 4. Характерный спектр излучения слабotoчного ГР лавинной формы: 1 – при одиночном видеоимпульсе положительной полярности, 2 – при видеоимпульсе отрицательной полярности

рицательной 2 полярности, а отложенные по оси ординат значения соответствуют максимальной интенсивности свечения ГР за каждым светофильтром, выраженной через ток ФЭУ: $I_{\text{ФЭУ}}$ (мкА). Каждой точке соответствуют значения, полученные при десятикратном повторении опыта. Из рисунка видно, что спектры в основном подобны в области 350–380 нм, а различаются в коротковолновой и в диапазонах 390–406 и 434–478 нм. Согласно [7, 8] спектры длин волн менее 280 нм характерны только для какого-то одного газа, и можно предполагать, что они образуются за счет диссоциации молекул [9]. Так, в области 240–260 нм при диссоциации высвечивает кислород за счет способности захватывать электроны с энергией 2–4 эВ. При этом молекула возбуждается и диссоциирует по следующему уравнению: $\text{O}_2 + e = \text{O}^- + \text{O} + h\nu$. Из рисунка следует, что этот процесс идет интенсивнее на импульсах отрицательной полярности, что, возможно, связано с большей величиной разрядного тока. Два максимума в области 340 и 360 нм приходятся на азот. По-видимому, здесь целесообразно говорить о длинах волн 337,1 и 357 нм, на которых интенсивно излучают молекулы данного газа [8]. (Следует отметить, что во влажном воздухе на длине волны 332 нм также излучают молекулы гидроксила ОН [3].) Далее наблюдается резкое снижение интенсивности свечения разряда для импульсов обеих полярностей, и в областях 390–406 и 434–478 нм вновь наблюдаются два небольших максимума. Причем второй максимум на импульсах положительной полярности выпадает. По-видимому, указанным диапазонам длин волн соответствуют молекулы СО и СО₂ [9], которые могут быть продуктами разложения или результатом эмиссии из материала диэлектрика, что наиболее вероятно при импульсах отрицательной полярности: $\text{CO}_2 + e = \text{O}^- + \text{CO} + h\nu$.

Совершенно очевидно, что детальная расшифровка таких спектров потребует использования более узкополосных фильтров, например поляризационно-интерференционных, и фактически позволит изучать ГР на начальной стадии его развития. Анализ самого спектра может быть расширен, например, в среднюю и дальнюю УФ-области, для чего, по-видимому, потребуется подбор или разработка соответствующих светофильтров, световодов или спектральных устройств. Также остается пока открытым вопрос и о спектральных характеристиках акустических колебаний разряда при данных режимах его возбуждения [10]. На основе предложенной методики регистрации интегрального спектра излучения лавинного ГР разработана конструкция прибора, названного нами «импульсным спектрографом». Позднее эта конструкция была использована в другом нашем приборе – «газоразрядном фотоаппарате», с помощью которого исследовались гранулированные и жидкофазные объекты [11].

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Разработана методика интегральной оценки спектра излучения лавинного ГР, возбуждаемого одиночными импульсами микросекундной длительности в узких разрядных промежутках с диэлектриком на электроде. С ее помощью установлено, что при импульсах отрицательной полярности ионизационные процессы в воздухе происходят интенсивнее, чем при положительной, а в исследованной области спектра излучения ГР его максимум приходится на границу фиолетового и ультрафиолетового участков.
2. Результаты данной работы могут быть использованы в спектроскопии быстропротекающих процессов с низкими интенсивностями излучения, а

также в технике высоких напряжений при оценке срока службы изоляции, подвергаемой воздействию слаботочного ГР лавинной формы.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам Томского политехнического университета Е. Т. Протасевичу и М. А. Шустову за полезные советы и критические замечания при обсуждении полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979.
2. Баньковский Н. Г., Коротков К. Г., Петров Н. Н. Физические процессы при формировании газоразрядных изображений (эффекте Кирлиан) // Радиотехника и электроника. 1986. 31, вып. 4. С. 625.
3. Шустов М. А., Протасевич Е. Т. Теория и практика газоразрядной фотографии. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2001.
4. Искольдецкий А. М., Нестерихин Ю. Е., Яншин Э. В. Электрофизические проблемы применения твердых и комбинированных диэлектриков в технике высоких напряжений. Новосибирск: Наука, 1974. С. 39.
5. Андреев С. И., Новикова Г. М. Исследование объемного разряда наносекундной длительности в воздухе при атмосферном давлении // ЖТФ. 1975. 55, № 8. С. 1692.
6. Лебедева В. В. Техника оптической спектроскопии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977.
7. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. М.–Л.: Гостехиздат, 1947.
8. Ретер Г. Электронные лавины и пробой газов. М.: Мир, 1968.
9. Иванов Э. В., Шестерин И. С., Телитченко М. М. О механизме получения изображения в импульсном высоковольтном разряде // Науч. докл. высш. школы. Биол. н. 1971. № 6. С. 133.
10. Астров Ю. А., Порцель Л. М. Исследование устойчивости однородного горения разряда в структуре «резистивный электрод – газоразрядный промежуток» /ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1979. Деп. в ВИНТИ, № 1494-80.
11. Бойченко А. П., Ачкасов Л. В. Газоразрядный фотоаппарат для фотографирования гранулированных и жидкофазных объектов // ЖНиНФ. 2002. 47, № 2. С. 68.

*Кубанский государственный университет,
E-mail: bojchenko@yandex.ru*

*Поступила в редакцию
20 февраля 2002 г.*