

УДК 543.423

## ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СПЕКТРОВ “ШАРОВАЯ МОЛНИЯ”

© В. Г. Гаранин, Е. М. Мандрик<sup>1</sup>

---

Рассмотрены основные типы аналитических разрядов. Проведено сравнение схмотехнических решений генератора “Шаровая молния” с электрическими источниками возбуждения спектров для атомно-эмиссионного анализа отечественного производства. На примере спектров углерода проведено сопоставление способов возбуждения. Показаны разные режимы работы генератора “Шаровая молния”, их стабильность и возможности изменения условий искрового возбуждения спектров.

---

Широкая номенклатура материалов, часто встречающихся в практике спектрального анализа, требует применения различных режимов возбуждения спектра для реализации методик анализа. Классическим способом возбуждения спектра является электрический разряд. От полярности, интенсивности и формы электрического разряда зависит оптический спектр, в котором проявляются аналитические линии определяемых элементов. Перед исследователем часто стоит задача выбора режима возбуждения спектра для одновременного определения в пробе основных компонентов и легирующих добавок. В этом случае могут применяться сложные формы электрического разряда с изменением полярности, амплитуды, формы и частоты импульсов в процессе обыскривания и экспозиции.

В практике спектрального анализа применяют огромное разнообразие электрических механизмов возбуждения спектров. При анализе твердых материалов наиболее широко используют дуговые (дуга постоянного, переменного тока непрерывная и прерывистая) и искровые (низковольтный и высоковольтный разряды).

Для понимания различий в типах разрядов рассмотрим в самом общем виде процесс формирования разряда в аналитическом промежутке.

Процесс развития разряда можно разбить на два основных этапа. На первом этапе, который длится менее  $10^{-7}$  с и по порядку величины равен времени дрейфа электронов в зазоре [1], под действием высокого напряжения происходит ударная ионизация газа в аналитическом промежутке. В это время лавина электронов создает в аналитическом промежутке ионы. Ионы и электроны движутся в электрическом поле и формируют канал разряда. Оптический спектр плазмы на этой стадии содержит только спектральные линии газов, заполняющих аналитический промежуток, так как анализируемое вещество еще не успевает испариться [2].

Второй этап сопровождается резким изменением напряжения на электродах до десятков вольт. На этом

этапе вольтамперная характеристика разряда имеет отрицательный наклон [3], т.е. с ростом тока напряжение на электродах падает. Поэтому формирование тока в разряде не требует высокого напряжения. Ионы воздуха и электроны, движущиеся в канале разряда, бомбардируют материал пробы, локально расплавляют, испаряют и выбрасывают вещество пробы в аналитический промежуток. На динамику поступления вещества пробы в канал разряда оказывает влияние плотность тока, которая, в свою очередь, зависит от амплитуды, длительности и формы импульса тока. Ток в канале разряда может достигать нескольких сотен ампер и определяется в основном возможностями источника возбуждения спектра. Таким образом, можно регулировать скорость поступления вещества пробы в аналитический промежуток путем задания импульса тока в начальный момент времени после поджига разряда [3]. Далее аналитический разряд может поддерживаться другим заданным током.

Для дуговых разрядов силой тока 0,5 – 40 А падение напряжения на электродах составляет десятки вольт, плотность тока при этом не превышает 10 А/мм<sup>2</sup>. Для искровых разрядов амплитудное значение напряжения составляет также десятки вольт, но плотность тока порядка 1000 А/мм<sup>2</sup> [4]. Столь высокой плотности тока можно достичь только за счет крутых фронтов импульсов тока в канале разряда со скоростью нарастания более 10 А/мкс. При такой скорости нарастания тока ионы за счет диффузии не успевают значительно увеличить площадь поперечного сечения канала разряда (порядка 0,1 мм<sup>2</sup>).

Следовательно, управляя длительностью и амплитудой тока разряда, можно создавать различную плотность тока в плазме, что соответствует разным режимам возбуждения спектра. Поэтому создание источника возбуждения спектра, в котором допускается управление параметрами тока разряда (амплитуда, длительность, форма импульса, частота) в ходе экспозиции, является актуальным и предоставляет инженеру-аналитику дополнительные возможности для разработки и реализации методик анализа.

---

<sup>1</sup> ООО “ВМК-Оптоэлектроника”, г. Новосибирск, Россия.

В известных источниках возбуждения спектра импульсный разряд формируется путем зарядки емкости  $RLC$ -контура высоким напряжением с дальнейшим разрядом его в аналитическом промежутке по мере достижения пробойного напряжения или с использованием дополнительного разрядника и тиратрона. Форма тока импульсного разряда определяется

параметрами  $RLC$  и представляет собой затухающие колебания [5].

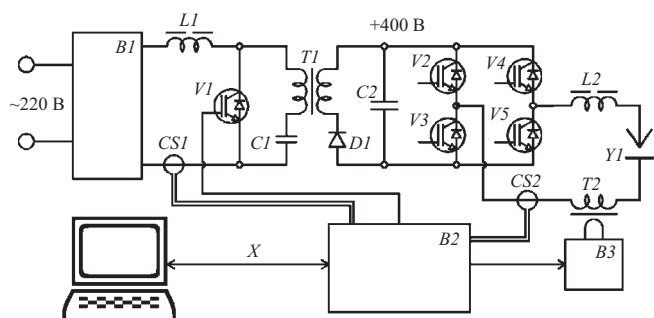
Ток дуговых разрядов стабилизируется при помощи балластного сопротивления, которое выделяет дополнительного тепла больше, чем используется в разряде энергии. Способ стабилизации тока с помощью балластного сопротивления не может иметь стабильность выше таковой сетевого напряжения 10 % [6].

Формирование разрядов типа “высоковольтная искра” осуществляется с использованием высокого напряжения (порядка 10 кВ) с помощью воздушных разрядников.

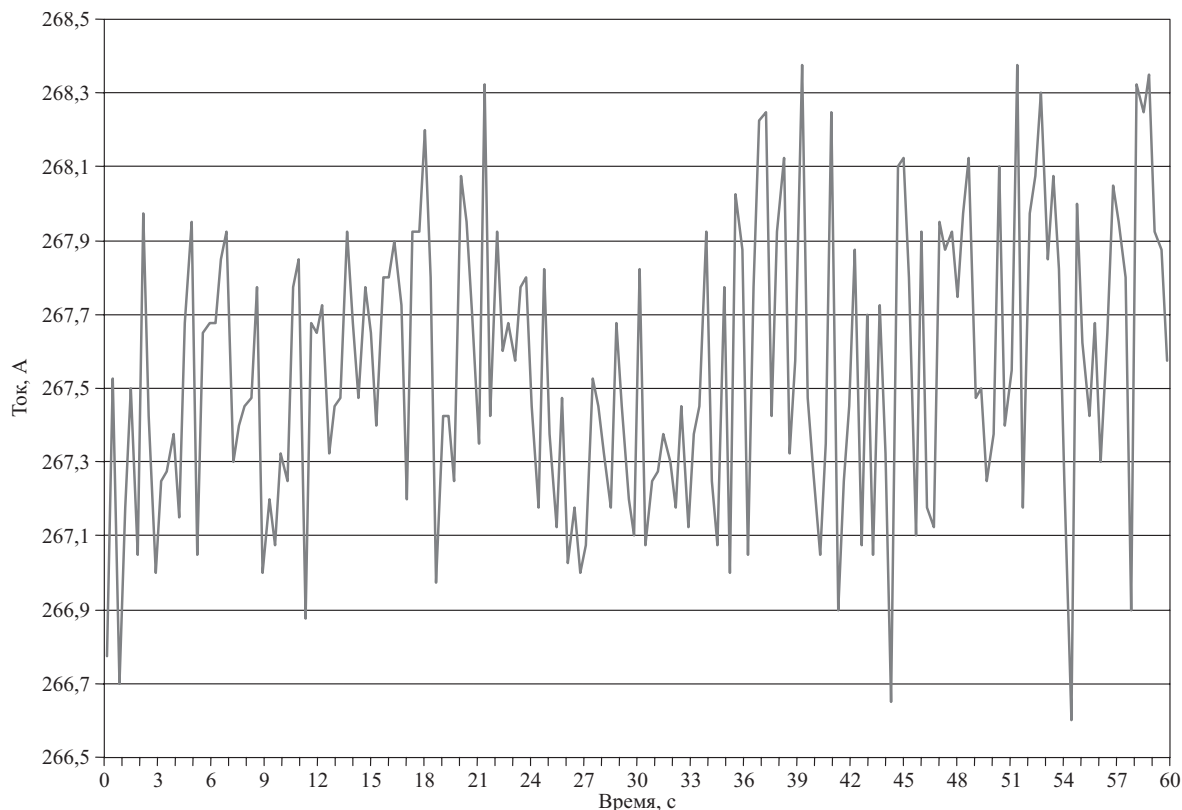
Современный уровень развития полупроводниковых приборов позволяет реализовать другой способ стабилизации тока и формирования импульсов с заданными параметрами в разряде, не требующий использования высоковольтных конденсаторов, воздушных разрядников и тиратронов.

В генераторе “Шаровая молния” (ШИМ) стабилизация тока осуществляется полупроводниковыми усилителями, работающими в режиме широтно-импульсной модуляции питающего напряжения на частотах до 50 кГц. При таком способе стабилизации появляется возможность оперативно изменять режимы работы генератора, например, интенсивность, полярность, форму тока в процессе экспозиции.

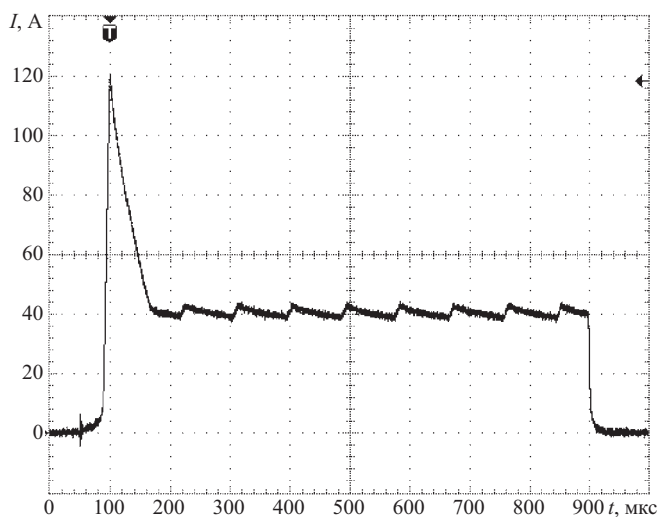
Электромагнитная совместимость обеспечивается применением схемы коррекции коэффициента мощности сети [9], а также наличием гальванической раз-



**Рис. 1.** Схема генератора тока “Шаровая молния”:  $B1$  — сетевой выпрямитель и фильтр;  $L1$  — дроссель корректора коэффициента мощности сети;  $CS1$  — бесконтактный датчик тока сети;  $V1$  — транзистор IGBT;  $C1$  — разделительный конденсатор;  $T1$  — высокочастотный разделительный трансформатор;  $D1$  — высокочастотный выпрямитель;  $X$  — оптоволоконный канал связи с компьютером;  $B2$  — цифровой блок управления генератором;  $C2$  — низковольтный накопительный конденсатор;  $V2 - V5$  — транзисторы ШИМ усилителя тока;  $CS2$  — бесконтактный датчик тока разряда;  $L2$  — дроссель фильтра ШИМ усилителя;  $T2$  — трансформатор поджига;  $B3$  — блок поджига;  $Y1$  — аналитический промежуток



**Рис. 2.** Результаты измерений импульсного тока в ходе экспозиции (графитовые электроды, зазор 2 мм,  $I_{cp} = 268$  А,  $t = 100$  мкс, ОСКО 0,14 %)



**Рис. 3.** Форма искрового импульса генератора “Шаровая молния” с начальным пиком тока 120 А и последующей стабилизацией на уровне 40 А

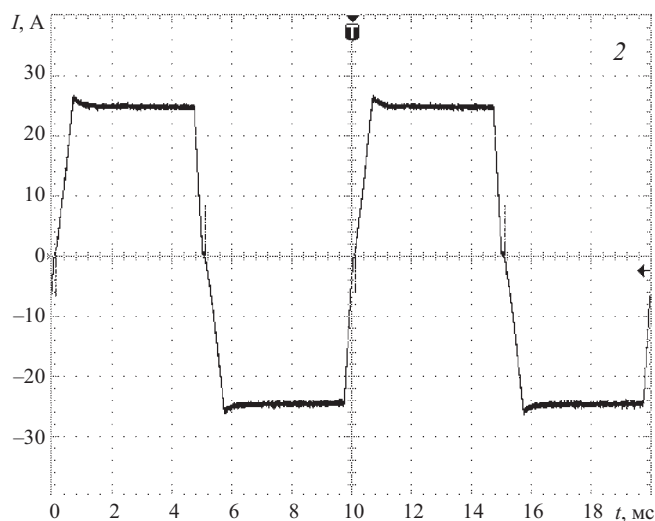
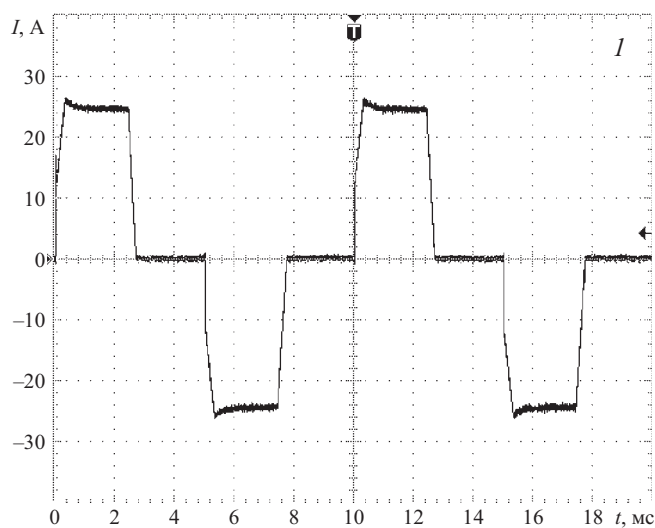
вязки между разрядным контуром и питающей сетью и соответствует отечественным и международным стандартам.

Схема, представленная на рис. 1, обеспечивает формирование дуговых и импульсных разрядов управляемой формы, частоты и полярности, соответственно появляется возможность регулировать начальный пик и последующий спад тока.

При этом возможно достичь высокой кратковременной и долговременной стабильности параметров разряда, не хуже 1 %. На рис. 2 представлены результаты измерений тока (длительностью 100 мкс и амплитудой 260 А) в разрядном промежутке 2 мм на воздухе с использованием графитовых электродов при экспозиции 60 с.

Проведенные исследования показали отсутствие значимой зависимости амплитуды и стабильности тока от размера аналитического промежутка и длительности импульса (см. таблицу). Некоторое увеличение погрешности измерений наблюдается на коротких импульсах. Более длинные импульсы могут быть как с одним током, так и с начальным выходом на более высокий ток (рис. 3). Форма тока дуги также представляет собой трапецию (рис. 4).

Для аналитика в дуговых режимах и режиме “низковольтная искра” нет существенных отличий ШМ по сравнению с прочими генераторами, выполненными



**Рис. 4.** Форма тока “Дуга переменного тока” 25 А 100 Гц со скважностью 50 % (1) и 100 % (2)

с использованием балластных резисторов и RLC-контуров. Для того чтобы перейти с одного генератора на другой, достаточно:

*дуга постоянного непрерывного тока* — задать направление тока и амплитудное значение, равное среднему для аналогичного режима;

*дуга переменного непрерывного тока* — задать амплитудное значение, равное среднему, и частоту для аналогичного режима;

*дуга постоянного прерывистого тока* — задать направление тока, амплитудное значение, частоту для

Значения относительного среднеквадратического отклонения тока разряда со средним амплитудным значением в импульсе 250 А, % отн.

Расстояние между электродами, мм	Длительность импульса, мкс					
	20	40	80	100	200	400
2	1,2	0,65	0,4	0,14	0,13	0,2
4	0,8	0,3	0,2	0,14	0,16	0,24

**Примечание.** Частота импульсов — 50 Гц, время экспозиции — 60 с.

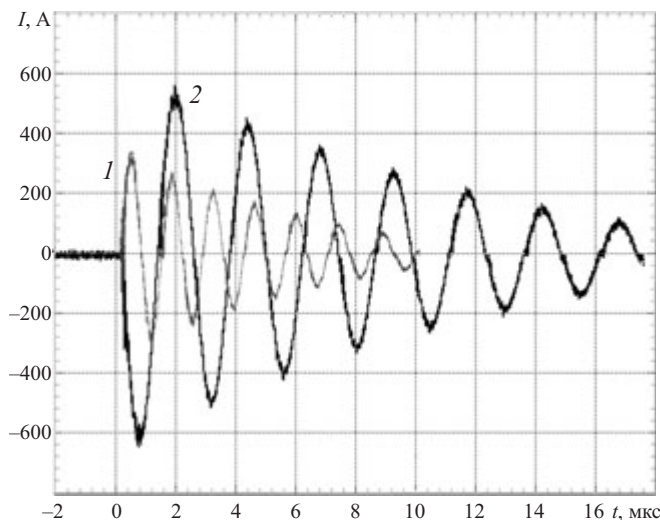


Рис. 5. Форма импульса тока генератора УГЭ-4 в режиме «высоковольтная искра»: 1 —  $L = 0$ ,  $C = 5$  нФ; 2 —  $L = 0$ ,  $C = 20$  нФ

аналогичного режима, а также установить скважность  $D$ , приближенно вычислив ее по формулам:

$$D = \sqrt{\frac{I_{\text{ср.кв}}}{I_{\text{ампл}}}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

$$D = \frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{ампл}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $I_{\text{ср.кв}}$ ,  $I_{\text{ср}}$  — средний квадратичный и средний ток соответственно для аналогичного режима;

*дуга переменного прерывистого тока* — задать амплитудное значение, частоту для аналогичного режима, а также установить скважность  $D$ , приближенно вычислив ее по формуле (1);

*режим «низковольтная искра»* — задать полярность, частоту следования импульсов для аналогичного режима, приближенно вычислив амплитуду тока  $I$  и длительность импульса  $t$  с напряжением заряда 300 В по формулам:

$$I = \frac{300 \text{ В}}{\sqrt{\frac{L}{C} + R_{\text{доп}}}}; \quad (3)$$

$$t = \pi\sqrt{LC}, \quad (4)$$

где  $L$ ,  $C$ ,  $R_{\text{доп}}$  — параметры разрядного контура в аналогичном режиме;

*режим «высоковольтная искра»* — необходимо создавать импульсы с высокой плотностью тока, а также за короткое время выделить большую энергию в аналитическом промежутке.

В соответствии с формулой, описывающей длительность полупериода колебательного контура,

$$\tau = \pi\sqrt{LC} \quad (5)$$

при наличии минимальной паразитной (определяемой конструкцией генератора и штатива) индуктивности  $L$  для уменьшения длительности импульса можно уменьшать только емкость конденсатора.

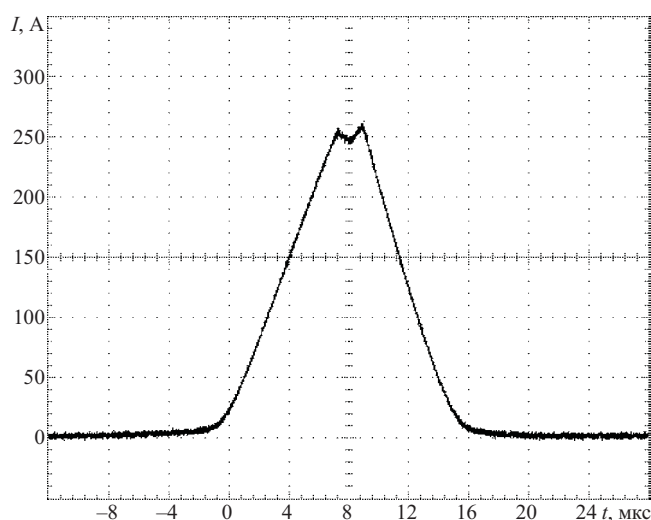


Рис. 6. Форма искрового импульса генератора «Шаровая молния» длительностью 10 мкс с амплитудой 250 А

При этом высокую плотность тока можно получить исключительно за счет увеличения напряжения  $U$  на конденсаторе  $C$ :

$$j = \frac{U}{\pi S} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (6)$$

где  $S$  — площадь сечения канала разряда.

Высокое напряжение (порядка 10 кВ) позволяет накопить в конденсаторе малой емкости (0,01 мкФ) достаточную энергию для создания в канале разряда с характерным сечением  $S \approx 0,1 \text{ мм}^2$  [7] импульса тока с минимальной длительностью импульса  $\tau \approx 1 \text{ мкс}$ , плотностью тока более  $1000 \text{ А/мм}^2$  при минимальной «паразитной» индуктивности  $L \approx 3 \text{ мкГн}$ .

Искровой разряд из  $RLC$ -контура является периодическим затухающим с периодом 2 мкс, длительностью 10 – 20 мкс, амплитудой до 500 А и фронтом нарастания до 500 А/мкс (рис. 5).

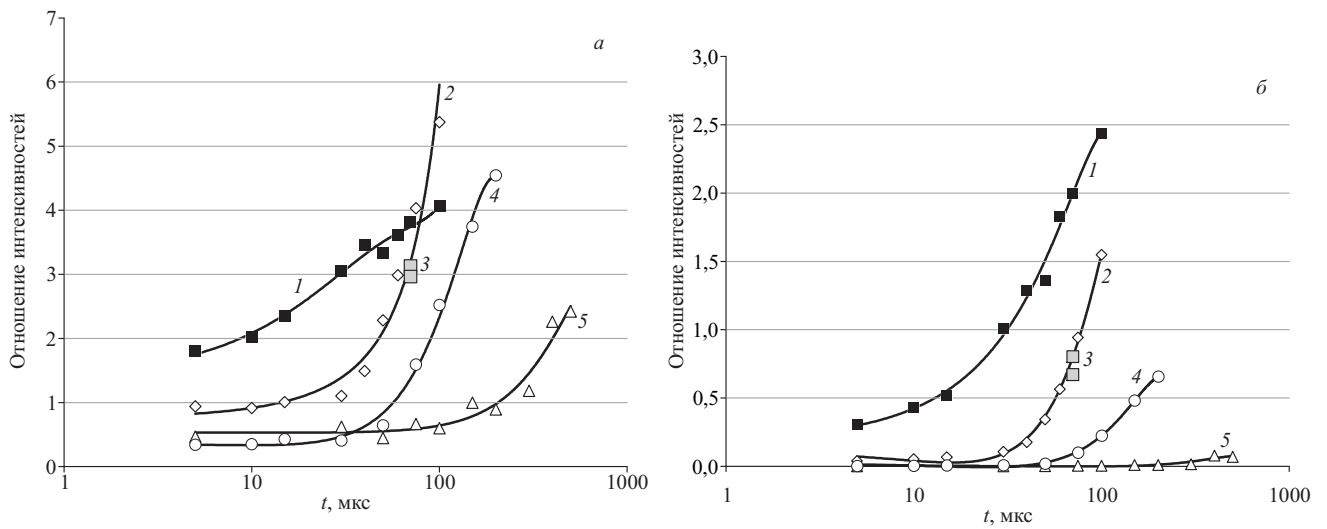
Форма искрового импульса тока генератора ШМ представляет собой трапецию с фронтами нарастания тока 50 А/мкс и амплитудой до 300 А (рис. 6).

Ввиду существенной разницы в форме и поведении тока в ходе единичного разряда, например для УГЭ-4 и ШМ, возникает необходимость корректного сопоставления режимов, применяемых на разных генераторах, и выбора наиболее близких к методически отработанным и проверенным.

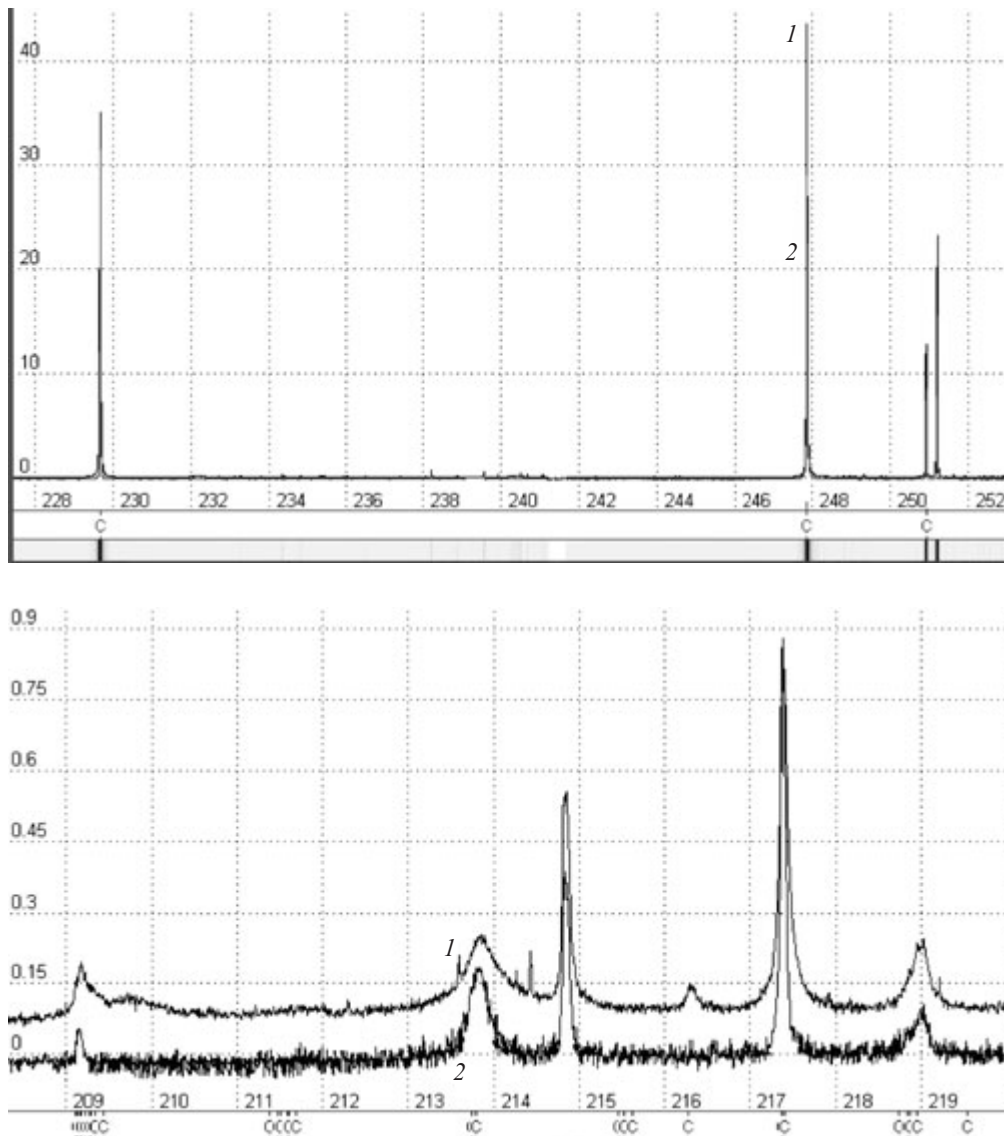
Одним из объективных свидетельств величины плотности тока в разряде является соотношение интенсивностей спектральных линий разной энергии возбуждения и степени ионизации. По интенсивностям спектральных линий углерода:

Длина волны, нм	С III 229,687	С I 247,8561	С II 250,9126
Энергия возбуждения, эВ	18,06	7,68	18,65

в спектрах разряда между двумя графитовыми электродами были построены зависимости (рис. 7) для не-



**Рис. 7.** Зависимость соотношений интенсивностей спектральных линий углерода от длительности импульса при разных значениях амплитуды тока: 1 — 250 А; 2 — 150 А; 3 — УГЭ-4; 4 — 100 А; 5 — 50 А; а — С III 229,687/С II 250,913; б — С III 229,687/С I 247,856



**Рис. 8.** Участки искрового спектра, линии углерода: 1 — УГЭ-4 ( $L = 0$ ,  $C = 20$  нФ), спектрометр МФС-8; 2 — «Шаровая молния», импульс 150 А, 75 мкс, спектрометр ПГС-2

скольких режимов с разными длительностями единичного импульса.

Ниже приведены режимы генератора «Шаровая молния» для эксперимента с графитовыми электродами:

Ток в импульсе, А	Длительность импульса, мкс
50	5, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600
100	5, 10, 15, 30, 50, 75, 100, 150, 200
150	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250
250	5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 70, 100, 150

Начальные участки кривых идут параллельно оси  $X$  и позволяют увидеть, что при коротких временах импульсов соотношение интенсивностей спектральных линий углерода с разной энергией возбуждения меняется незначительно, до определенного момента растет интенсивность линий, а с увеличением длительности импульса наблюдается существенное изменение этих соотношений.

На рис. 7 показано положение точек, соответствующих по соотношению интенсивностей спектральных линий искровым импульсам генератора УГЭ-4 ( $L = 0$ ,  $C = 5$  нФ и  $L = 0$ ,  $C = 20$  нФ). На всех графиках указанные точки близки к режиму генератора «Шаровая молния» (150 А; 70 мкс), что подтверждается и характером спектра на разных участках длин волн (рис. 8).

Используя эту информацию, при разработке методики анализа можно выбрать наиболее подходящий режим обескряживания по степени проработки поверхности, яркости спектральных линий, стабильности соотношений аналитических линий и линий сравнения.

В настоящее время генераторы «Шаровая молния» применяются на предприятиях при анализе высоколегированных сталей, металлов и сплавов на ос-

нове меди, алюминия свинца и других металлов в аргоновых и воздушных штативах.

Создан и применяется на практике программируемый генератор для возбуждения атомно-эмиссионных спектров «Шаровая молния», в котором реализована полупроводниковая схема формирования разряда тока в аналитическом промежутке.

Управление генератором осуществляется от компьютера и не требует участия оператора при смене режимов генерации во время работы с разными методиками анализа. Генератор позволяет изменять режим генерации (полярность, амплитуда тока, частота) в ходе одной экспозиции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Королев Ю. Д., Месля Г. А. Физика импульсного пробоя газов. — М.: Наука, 1991. — 223 с.
2. Перминов А. В., Тренькин А. А. / Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 9. С. 52 – 55.
3. Зайдель А. Н., Калитеевский Н. И., Липис Л. В., Чайка М. П. Эмиссионный спектральный анализ атомных материалов. — Л.-М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. — 686 с.
4. Долгов Г. Г., Мандельштам С. Л. Плотность и температура в искровом разряде / Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1953. Т. 24. Вып. 6. С. 691 – 707.
5. Орешенкова Б. Г. Спектральный анализ. — М.: Высшая школа, 1982. — 375 с.
6. Универсальный генератор с электронным управлением УГЭ-4. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — М.: Внешторгиздат, 1980. — 128 с.
7. Абрамсон И. С., Гегечкори Н. М., Дробкина С. И., Мандельштам С. Л. / Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1947. Т. 17. Вып. 10. С. 862 – 867.
8. Директива ЕС по ЭМС 89/336/ЕЕС.
9. Панфилов Д. И., Иванов В. С. / Chip News (Новости о микросхемах). 1997. № 9 – 10. С. 38 – 45.