

*Масленников С.П.<sup>1</sup>, Комаров Д.А.<sup>1,2</sup>, Дармаев А.Н.<sup>1,2</sup>,  
Морев С.П.<sup>1,2</sup>, Дрибас И.Н.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

<sup>2</sup>АО «НПП «Торий»

## **Стабильность тока в многослойных гетерогенных углеродосодержащих автоэмиссионных катодно-сеточных ячейках при работе в импульсном режиме**

*В работе рассмотрен вопрос стабильности токовых характеристик автоэмиссионной ячейки. Представлены результаты экспериментов и моделирования.*

**Ключевые слова:** Автоэмиссионные ячейки, автоэммиттеры на основе алмазоподобного графита, импульсный режим работы.

Использование автоэмиссионных источников тока является одним из перспективных направлений в области разработки электровакуумных приборов. Возможная область применения таких источников весьма широка – усилители и генераторы сверхвысоких частот (СВЧ), мощные ключевые лампы систем защиты высоковольтных источников питания, люминофоры и т.д. Однако, любое применение источника тока, прежде всего, ставит задачу о стабильности токовых характеристик во времени. Так, гарантированная стабильность выходных характеристик мощных приборов СВЧ должна составлять не менее 1000 часов непрерывной работы, что полностью определяется стабильностью тока катода. Для некоторых применений эта величина составляет до 500 000 часов, например, для приборов космического базирования.

На стабильность автоэмиссионных структур влияют многочисленные факторы: уровень вакуума, наличие ионной бомбардировки, технология изготовления самой структуры [1,2]. Тем не менее, большинство исследований направлено на достижение максимальной плотности автоэмиссионного тока, а не на обеспечение конкретных технических требований, предъявляемых к устройству.

В работе [1] была теоретически проанализирован планарный автоэмиссионный триод, основным преимуществом которого является фактически полное исключение ионной бомбардировки поверхности эмиттера. Экспериментальное исследование подобной структуры [3] в режимах, близких к штатному режиму работы изделия в аппаратуре, выявили ряд принципиальных недостатков, ограничивающих область использования автоэмиссионных катодов. В данной статье проводится анализ стабильности автоэмиссионной структуры с течением времени.

Многообразие физических процессов в автоэмиссионных ячейках, связанных с процессами адсорбции и десорбции остаточного газа, с объемной адсорбцией из поверхности материала, с процессами внешнего натекания т.е. с диффузией газа через поверхность корпуса ячейки, с микроискрениями и возникновением стабильной фазы разряда в вакууме, ионная бомбардировка и т.д. [2], не позволяет дать сколь-нибудь

адекватную теоретическую модель работы источника тока. В связи с этим основным методом исследований стабильности автоэмиссионных ячеек является эксперимент.

На рис. 1 представлена экспериментальная схема для исследований стабильности свойств планарных автоэмиссионных ячеек (АЭЯ). Высоковольтный блок питания (ВБП) обеспечивал подачу напряжения на анодный электрод АЭЯ. Выходное напряжение ВБП плавно регулировалось от 0 до 2.5 кВ. Прямоугольные импульсы напряжения, подаваемые на управляющий электрод АЭЯ, формировались с помощью генератора управляющих импульсов (ГУИ). Максимальная амплитуда управляющих импульсов составляла  $U_y = 300$  В. Длительность импульсов регулировалась от 5 до 20 мкс, длительности фронта и спада импульсов на выходе ГУИ не превышали 100 нс.

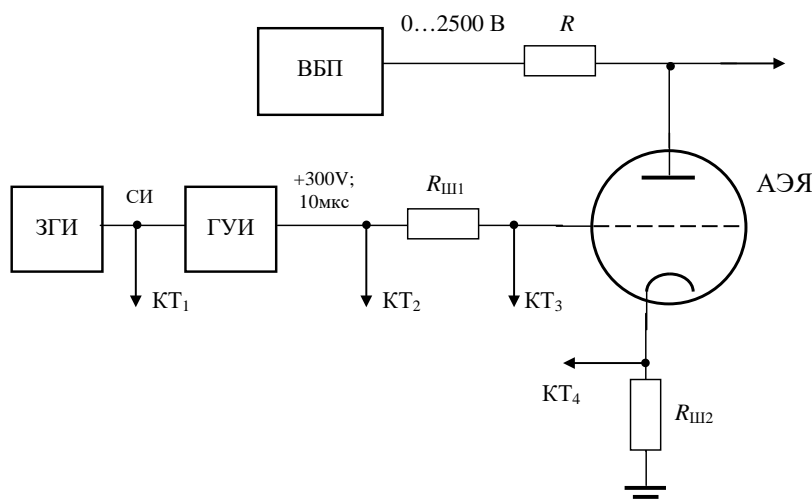


Рис. 1. Экспериментальная схема: ЗГИ – задающий генератор импульсов; ГУИ – генератор управляющих импульсов; ВБП – высоковольтный блок питания; АЭЯ – автоэмиссионная ячейка; СИ – синхроимпульс;  $R_{ш1}$ ,  $R_{ш2}$  – резистивные шунты;  $КТ_1 \dots КТ_4$  – контрольные точки экспериментальной схемы.

Экспериментальные исследования проведены на основе опытных образцов АЭЯ, оснащенных ионно-гетерными насосами, которые использовались для непрерывной откачки вакуумных баллонов АЭЯ в процессе их работы, а также для предварительной откачки после перерывов в работе ячеек. Время предварительного обезгаживания ячеек до подачи высокого напряжения составляло 2-3 часа. Для исследований были использованы опытные образцы АЭЯ с общей площадью автоэмиссионных структур от 0.35 до 1.0 мм<sup>2</sup>.

Проведенные исследования свидетельствуют, что наиболее динамичное изменение эмиссионных свойств АЭЯ наблюдалось на начальной фазе их работы. На рис.2 представлена зависимость тока эмиссии от времени при испытаниях одного из образцов АЭЯ в течение 500 минут ее работы. Площадь автоэмиссионной структуры  $S=0.5$  мм<sup>2</sup>. Условия импульсного электропитания ячейки в рассматриваемом опыте были следующие: амплитуда импульса напряжения на промежутке катод-сетка  $U_{кс}=155$  В, частота следования импульсов  $f=100$  Гц, длительность импульсов  $t_{и}=10$  мкс. Периодически во время кратковременных пауз в работе ячейки выполнялись измерения параметров ВАХ. В рассматриваемом опыте измерения ВАХ были выполнены четыре раза: до начала работы ячейки ( $t=0$  мин), а также после 60, 260 и 380 мин ее работы.

Полученные результаты свидетельствуют, что эмиссионные свойства АЭЯ резко изменялись после проведения измерений параметров ВАХ. Причина этого связана с электрическими пробоями, происходившими в ячейке, при повышенных напряжениях импульсов управления. Пробои приводили к необратимым повреждениям структуры эмиттера и изменениям его режимов эмиссии, что согласуется с результатами, представленными в [1].

На рис.2 представлены экспериментальные ВАХ, полученные для времени наработки ячейки:  $t=0$  мин,  $t=60$  мин,  $t=260$  мин и  $t=380$  мин.

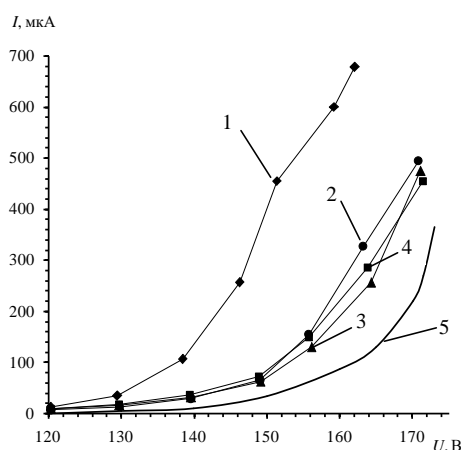


Рис. 2 - Динамика ВАХ в процессе работы АЭЯ:

1 -  $t=0$  мин; 2 -  $t=60$  мин; 3 -  $t=260$  мин; 4 -  $t=380$  мин; 5 – моделирование с учетом пленки окисла на поверхности.

Результаты показали, что при работе ячейки ее ВАХ сместилась в область повышенных напряжений, при этом максимальный сдвиг ВАХ был зафиксирован на первом часу работы. При последующих измерениях были получены ВАХ с близкими параметрами, форма ВАХ в целом стабилизировалась.

В связи с необратимыми повреждениями структуры, возникающими при повышенных напряжениях управления, исследования долговременной стабильности эмиссионных свойств ячеек проводились без промежуточных измерений параметров ВАХ. На рис.3 представлены результаты испытаний двух образцов АЭЯ, которые были проведены при различных экспериментальных условиях.

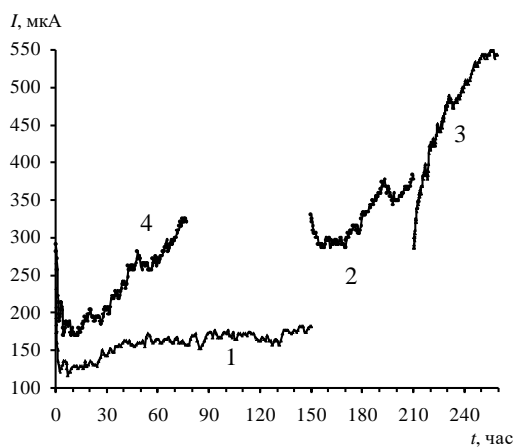


Рис.3. Зависимости тока эмиссии от времени

Образцы изготовлены на единой подложке, они обладали близкими конструктивными и исходными эмиссионными параметрами. Площадь автоэмиссионных структур опытных образцов составляла  $S=0.5\text{мм}^2$ .

Испытания первого образца были проведены при различных режимах работы ячейки и могут быть разделены на три последовательных этапа. Суммарная продолжительность испытаний первого образца составила  $\sim 250$  часов.

Испытания стабильности эмиссионных свойств второго опытного образца (кривая 4) были проведены при  $U_{\text{КС}}=168$  В,  $t_{\text{и}}=10$  мкс,  $f=1$  кГц. Продолжительность испытаний  $\sim 75$  часов. Начальная фаза работы ячейки сопровождалась быстрым спадом эмиссионного тока, в результате которого в течение  $\sim 2,5\dots 3$  часов ток снизился с  $\sim 380$  мкА до  $\sim 190$  мкА. В дальнейшем спад тока замедлился и уровень эмиссионного тока в течение  $\sim 10$  часов работы оставался относительно стабильным. Последующая работа ячейки проходила на фоне постепенного увеличения тока, который к моменту окончания испытаний превысил свой стартовый уровень ( $\sim 300$  мкА).

Результаты экспериментов позволяют утверждать, что стабильность токовых характеристик существенно зависит от режима работы АЭЯ. Работа на пологом участке ВАХ характеризуется постоянством автоэмиссионного тока с течением времени, в то время, как работа на крутом участке ВАХ дает постоянное нарастание катодного тока. Анализ результатов эксперимента и расчета показывает, что стабильность работы АЭЯ, прежде всего, связана с тепловыми процессами, следствием которых становится нарушение равновесия газовых процессов адсорбции и десорбции остаточных молекул на поверхности катода.

#### Библиографический список

1. Морев С. П., Абаньшин Н.П., Горфинкель Б. И. // РиЭ. 2013. Т. 58. № 4. С. 399.
2. Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: МФТИ, 2001.
3. 3. А.Н. Дармаев, Д.А. Комаров, С.П. Масленников, С.П. Морев. Принципиальные ограничения использования автоэмиссионных структур в качестве катодов мощных импульсных электровакуумных приборов сверхвысокочастотного диапазона. РиЭ, 2015, №9 стр.967.