

УДК 621.317.31

А. П. КИСЛИЦЫН, А. А. ТАРАН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭМИССИОННОГО ТОКА ОТ АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОДИНОЧНОМУ ИМПУЛЬСУ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

*Представлены результаты исследований, которые направлены на определение эмиссионных характеристик термокатода по одиночному импульсу высокого анодного напряжения в экспериментальном вакуумном диоде. Установлена возможность определения зависимости эмиссионного тока катода от анодного напряжения на основании контролируемых временных зависимостей напряжения и токового отклика на фронтах импульса. Предлагаемый метод не противоречит существующим стандартам измерения эмиссионных характеристик термокатодов и позволяет осуществлять их контроль при быстропотекающих процессах.*

**Ключевые слова:** термокатод, эмиссионные свойства, импульсные измерения, одиночный импульс, токовый отклик.

**1. Общая постановка проблемы и её связь с научно-практическими задачами**

Совершенствование имеющихся и разработка новых электровакуумных и газоразрядных устройств требует настойчивого поиска и исследования материалов, обладающих необходимыми эмиссионными свойствами в заданных рабочих условиях. Поиск материалов для термокатодов предполагает комплекс испытаний, среди которых эмиссионные испытания играют главенствующую роль. Основной первичной информацией, получаемой при таких испытаниях, является зависимость эмиссионного тока катода ( $I_{эм}$ ) от величины анодного напряжения ( $U_a$ ), а именно  $I_{эм} = f(U_a)$ . Изменения этих зависимостей в процессе эмиссионных испытаний или при работе эмиссионных устройств позволяют говорить о происходящих преобразованиях эмитирующей поверхности катода [1]. При этом, на основании зависимостей  $I_{эм} = f(U_a)$ , можно установить оптимальный режим активирования катода, диапазоны его рабочих температур и отбираемых эмиссионных токов, определить степень неоднородности эмитирующей поверхности [2] и механизм, обеспечивающий эмиссионную способность катода [3], сформулировать требования к условиям работы катода и пр.. Отмеченные моменты объясняют причину повышенных требований, предъявляемых к достоверности экспериментальных зависимостей  $I_{эм} = f(U_a)$ , особенно при исследованиях новых материалов.

В эмиссионной электронике последнее время возрастает интерес к изучению влияния быстропотекающих процессов на свойства материалов. Такими процессами могут быть изменения теплового

режима эмитирующей поверхности при отборе токов большой плотности, взаимодействие поверхности с отравляющими газами, поток которых изменяется с течением времени, и ряд других процессов.

Так, например, в [4] было показано, что даже в случае одиночных прямоугольных импульсов высокого напряжения дополнительный разогрев поверхности оксидного катода, зависящий от величины отбираемого тока, может составлять десятки и даже сотни градусов. Это обстоятельство приводит к необходимости контроля эмиссионных свойств катода при каждом импульсе отбираемого тока.

Помимо этого, при изучении воздействий чужеродных атомов на эмиссионные свойства катода, в частности газов остаточной атмосферы, важно установить кинетику этих воздействий. В этом случае измерения зависимостей  $I_{эм} = f(U_a)$ , характеризующих эмиссионную систему, должны осуществляться в течение как можно более коротких промежутков времени. Только в этом случае информация, получаемая из зависимостей  $I_{эм} = f(U_a)$ , будет соответствовать вполне определенному состоянию поверхности.

Следует заметить, что минимальным промежутком времени для получения информации об эмиссионных свойствах поверхности может быть продолжительность одиночного импульса высокого напряжения (импульса отбора эмиссионного тока). Однако в этом случае результаты измерений требуют дополнительной обработки для получения достоверных зависимостей  $I_{эм} = f(U_a)$ .

Исходя из сказанного, восстановление зависимости  $I_{эм} = f(U_a)$  на основании измерений в одиночных импульсах высокого напряжения, является актуальной задачей эмиссионной электроники.

## 2. Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем

Импульсные измерения эмиссионных токов появились уже на начальном этапе исследований классических оксидных катодов. Такие измерения были обусловлены стремлением сократить время отбора эмиссионного тока для уменьшения перегрева оксидного слоя катода проходящим током [5]. В этом случае эмиссионному току ставилось в соответствие амплитудное значение тока, измеренное на полке импульса. Связанные значения тока и напряжения формировали эмиссионную характеристику исследуемого материала. Подобное определение характеристик (по точкам) требует достаточно большого времени, что создает определенные трудности как в организации измерений, так и в получении конечного результата. В [6] было предложено осуществлять измерение зависимостей  $I_{эм} = f(U_a)$  серией коротких импульсов, амплитуда напряжения которых изменялась по линейному закону от  $U_{мин}$  до  $U_{мах}$ . Благодаря этому удалось сократить время измерения зависимостей. Но обработка результатов измерений требовала много времени. В [7] был описан стенд для контроля эмиссионных характеристик катодов вакуумных диодов. Использование микропроцессора (small on-line computer) позволило существенно упростить процесс обработки результатов и сократить время, затрачиваемое на эту обработку.

Однако использование импульсных измерений с короткими импульсами ( $\sim 1$  мкс и короче) создало другую проблему, связанную с искажениями импульсов анодного напряжения и токового отклика реактивными элементами анодной цепи. Получение неискаженной характеристики  $I_{эм} = f(U_a)$  по таким измерениям и обеспечение достоверности результатов требует серьезной последующей обработки.

Требования к достоверности и сопоставимости результатов, получаемых в различных лабораториях (исследовательских и производственных), привели к разработке и принятию стандартов импульсных измерений тока эмиссии [8, 9]. В соответствии с ними (действующими на сегодняшний день) импульсные измерения эмиссионных токов должны осуществляться с использованием только прямоугольных импульсов. Такая форма импульса высокого напряжения гарантирует наличие на импульсе токового отклика относительно плоской вершины, где величина анодного тока не искажена реактивными элементами анодной и измерительной цепи. На этой полке анодный ток соответствует эмиссионному току (за вычетом токов утечки). Уход от прямоугольной формы импульса высокого напряжения не позволяет гарантировать непосредственный контроль величины эмиссионного тока катода. Так результаты, при-

веденные в [10, 11], были получены авторами при использовании импульсов далеко не прямоугольной формы. Восстановленные зависимости  $I_{эм} = f(U_a)$  не гарантируют достоверности информации из-за отсутствия реперных точек. В случае прямоугольных импульсов такие точки могут быть выбраны на полках импульсов.

Импульсные измерения для получения неискаженных вольт-амперных характеристик р-п переходов полупроводниковых структур описаны в [12]. В этой работе авторы используют именно прямоугольные импульсы с последующей компьютерной обработкой результатов измерений.

Для восстановления эмиссионной зависимости  $I_{эм} = f(U_a)$ , характеризующей материал катода, вполне оправданной представляется обработка сигналов, соответствующих фронтам одиночного прямоугольного импульса напряжения и токового отклика. При этом, соблюдая требования ГОСТов, на полках импульсов выбираются реперные точки, которые обеспечивают возможность тарировки всей контрольно-измерительной системы, и получение достоверной информации об эмиссионных характеристиках исследуемых материалов.

До настоящего времени такая задача восстановления зависимости  $I_{эм} = f(U_a)$  на основании результатов измерений по фронтам одиночного импульса высокого напряжения остро не стояла и исследований в этой области не проводилось. Однако, как это было отмечено выше, наблюдаемая в некоторых процессах высокая изменчивость эмитирующей поверхности требует проведения измерений за очень малые промежутки времени для обеспечения квазиинвариантности состояния поверхности в процессе измерений. Это обуславливает актуальность задачи восстановления зависимости  $I_{эм} = f(U_a)$  по измерениям анодного напряжения и токового отклика одиночных импульсов высокого напряжения.

## 3. Цель исследований

Целью данной работы является разработка алгоритма восстановления зависимости  $I_{эм} = f(U_a)$  на основании измерений одиночного импульса высокого напряжения и его токового отклика в экспериментальном диоде, предназначенном для исследований термоэмиссионных свойств материалов.

## 4. Результаты исследований

Особенностью решаемой задачи является то обстоятельство, что каждая пара импульсов (напряжение и токовый отклик) является индивидуальной. Импульсы высокого напряжения, формируемые генератором, хоть и соответствуют требованиям к

прямоугольным импульсам, но не обладают абсолютной повторяемостью, что является атрибутом высоковольтной техники. В результате, при восстановлении зависимости  $I_{эм} = f(U_a)$  необходимо вести обработку регистрируемых зависимостей для каждого конкретного измерения. Результаты измерений передаются в компьютер в виде квантованных по уровню и дискретизованных по времени решетчатых функций. Восстановление аналоговой формы сигналов анодного напряжения  $U_a = f_1(t)$  и токового отклика  $I_a = f_2(t)$  и последующее их аналитическое представление для фронтов импульса может быть реализовано существующими стандартными методами, в частности [13, 14]. Аналитическое представление сигналов необходимо для последующей обработки информации.

Анализируя токовый отклик ( $I_a$ ), в первую очередь следует отметить, что он определяется как эмиссионными свойствами катода, так и электрическими параметрами экспериментального диода. Это обстоятельство можно отобразить следующим соотношением:

$$I_a = I_{эм} + I_{сис},$$

где  $I_{эм}$  – вклад эмиссионного тока катода в величину токового отклика;  $I_{сис}$  – вклад, обусловленный электрической системой экспериментального диода.

Отсюда видно, что для выделения интересующего нас эмиссионного тока катода необходимо знать вклад, который вносит в общий токовый отклик электрическая система экспериментального диода.

Рассмотрим конструктивную схему экспериментального диода (см. рис. 1). Величина анодного тока (токовый отклик  $I_a$ ) контролируется по падению напряжения на омическом измерительном со-

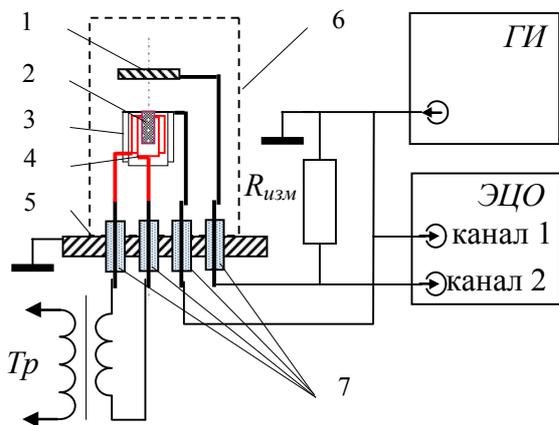


Рис. 1. Конструктивная схема экспериментального диода для исследований эмиссионных свойств материалов:

- 1 – анод, 2 – катод, 3 – тепловые экраны,
- 4 – резистивный нагреватель, 5 – монтажный фланец, 6 – вакуумная камера, 7 - гермовыводы

противлению  $R_{изм}$ . В общем случае величина анодного тока, как было отмечено выше, будет равна сумме эмиссионного тока образца и тока обусловленного электрической системой экспериментального диода. Последний можно разделить на ток утечки по конструктивным изолирующим элементам ( $I_{ут}$ ) и ток смещения ( $I_{см}$ ), обусловленный изменяющимся электрическим полем в промежутке катод-анод

$$I_{сис} = I_{ут} + I_{см}.$$

Ток смещения определяется емкостью промежутка катод-анод и скоростью нарастания анодного напряжения.

Величина емкости промежутка катод-анод, с учетом конструктивных особенностей экспериментального диода, оказывается порядка нескольких пикофард. При импульсе высокого напряжения 1 кВ с длительностью фронта 1,5 мкс такая емкость обеспечит ток смещения на уровне нескольких миллиампер. Ток смещения будет отсутствовать в измерительной цепи, когда напряженность электрического поля в пространстве катод-анод не изменяется с течением времени, т.е. на полке импульса высокого анодного напряжения. Это обстоятельство позволяет обеспечить калибровку величины эмиссионного тока согласно действующим ГОСТам [7, 8] при неизменном значении анодного напряжения.

При холодном состоянии катода эмиссионный ток отсутствует. Токовый отклик на импульс высокого напряжения в этом случае определяется только током смещения и током утечки. Результат подобных измерений представлен на рис. 2. Осциллограммы токового отклика позволяют сделать вывод о правомерности сделанных оценок величины тока смещения и уточнить значение величины емкости в анодной цепи, которая составляет 2,0 пФ.

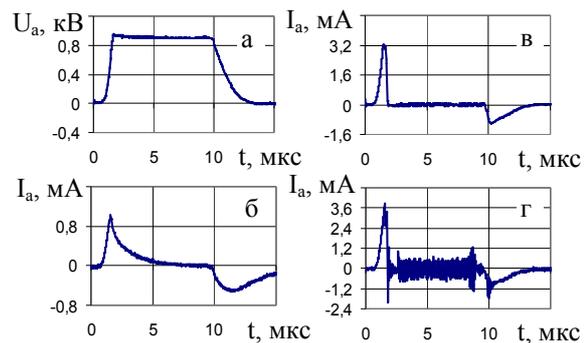


Рис. 2. Импульсы анодного напряжения (а) и токовых откликов (б, в и г) при холодном катоде для различных величин измерительного сопротивления:

$$R_{изм} : б - 10 \text{ кОм}, в - 1 \text{ кОм}; г - 100 \text{ Ом}$$

На осциллограммах токового отклика наблюдаются колебания, амплитуда которых заметно увеличивается при малых измерительных сопротивлениях в анодной цепи (см. рис. 2, г)). Эти колебания

(рис. 3) имеют частоту 12...13 МГц и свидетельствуют о наличии индуктивности в анодной цепи экспериментального диода, величина которой составляет 3,0...3,5 мГн.

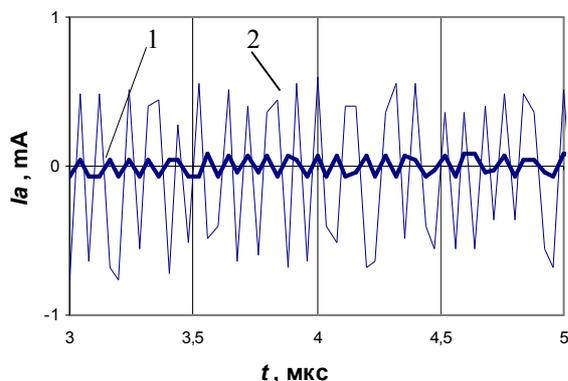


Рис. 3. Колебания на полке токового отклика при холодном катоде для различных измерительных сопротивлений:  
 $R_{изм}$  : 1 – 1000 Ом, 2 – 100 Ом

Сопротивление утечки по гермоводам в холодном состоянии диода имеет величину  $\sim 1$  ГОм. В этом случае при рабочих анодных напряжениях 1...6 кВ ток утечки не должен превышать нескольких микроампер и им можно пренебречь.

Предварительные исследования экспериментального диода и контрольно-измерительного стенда позволили составить их эквивалентную схему (см. рис. 4), которая со значениями параметров ее элементов использовалась в последующей обработке сигналов напряжения и токового отклика.

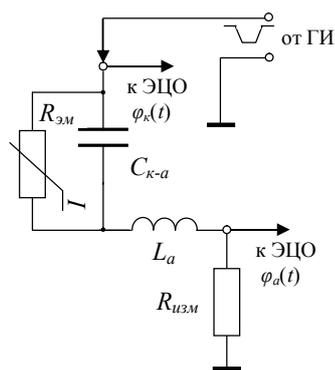


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема экспериментального диода

На первом этапе обработки результатов исходные решетчатые функции сигналов  $\varphi_k(t)$  и  $\varphi_a(t)$  восстанавливаются в аналоговой форме и определяются аппроксимирующие их кусочно-непрерывные аналитические функции. Результаты этих операций представлены на рис. 5 и 6.

На основании полученных аналитических зависимостей был проведен расчет величины тока сме-

нения, протекающего через емкостной промежуток  $C_{к-а}$  и эмиссионного тока, протекающего через  $R_{эм}$  в эквивалентной схеме экспериментального диода. Временная зависимость эмиссионного тока на фронте импульса приведена на рис. 7.

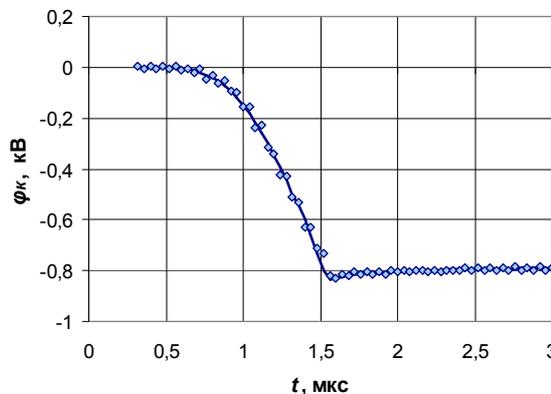


Рис. 5. Передний фронт импульса напряжения (потенциал катода):  
точки – решетчатая функция,  
линия – аппроксимирующая функция

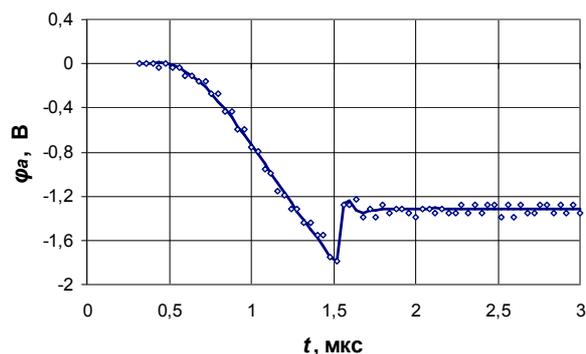


Рис. 6. Передний фронт импульса потенциала анода (пропорциональный токовому отклику):  
точки – решетчатая функция,  
линия – аппроксимирующая функция

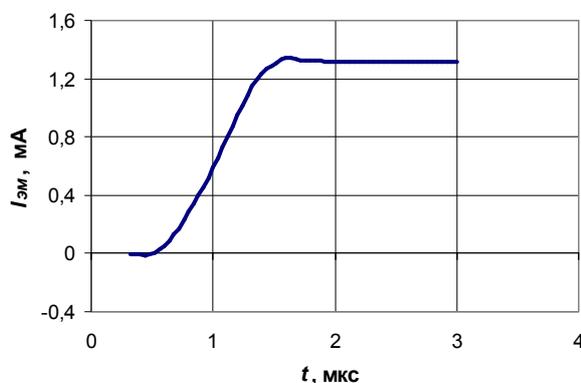


Рис. 7. Временная зависимость тока эмиссии катода на переднем фронте импульса

Восстановленная зависимость эмиссионного тока катода от времени и временная зависимость разности потенциалов на промежутке катод-анод (анодное напряжение) позволяют построить эмиссионную характеристику – зависимость  $I_{эм} = f(U_a)$ , которая представлена на рис. 8.

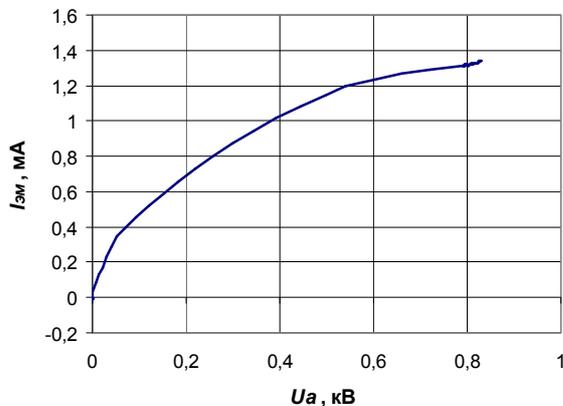


Рис. 8. Зависимость  $I_{эм} = f(U_a)$ , восстановленная по переднему фронту одиночного импульса высокого напряжения

Вид полученной зависимости совпадает с видом традиционных вольтамперных характеристик вакуумных диодов с термокатодом. Это позволяет говорить о правомерности выбранного подхода для восстановления эмиссионных зависимостей  $I_{эм} = f(U_a)$  по фронту одиночного импульса.

Эмиссионные зависимости  $I_{эм} = f(U_a)$ , полученные для больших величин эмиссионных токов (рис. 9), имеют меньшие искажения.

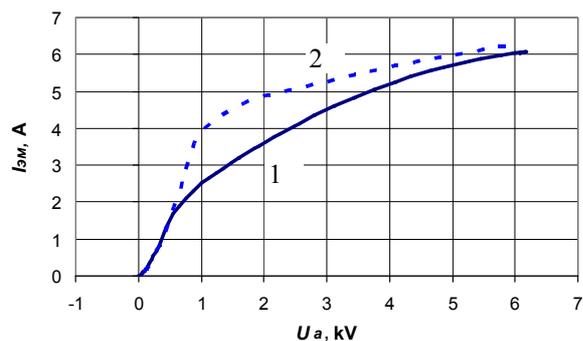


Рис. 9. Зависимость  $I_{эм} = f(U_a)$ , восстановленная по переднему и заднему фронтам одиночного импульса высокого напряжения при высокой эмиссионной способности катода:

1 – по переднему фронту, 2 – по заднему фронту

Наблюдаемое несовпадение зависимостей восстановленных по переднему и заднему фронтам позволяют предположить наличие быстропротекающих процессов на эмитирующей поверхности и в пространстве катод-анод в течение самого импульса (5 мкс). Этот результат должен быть учтен при пла-

нировании новых исследований эмиссионных систем с возможностью контроля влияний быстро протекающих процессов.

## Выводы

Современная измерительная и компьютерная техника позволяют реализовать контроль зависимости  $I_{эм} = f(U_a)$  для катодных материалов в течение одиночного импульса высокого напряжения. Использование прямоугольных импульсов обеспечивает возможность выделения реперных точек на полках импульсов для обоснованной тарировки восстановленной зависимости.

Восстановление зависимостей  $I_{эм} = f(U_a)$  по фронтам импульса требует проведения предварительных измерений в экспериментальном диоде с холодным (неэмитирующим) катодом. Эта процедура необходима для определения параметров анодной цепи, которые используются при компьютерной обработке исходных сигналов.

Обнаруженное в процессе восстановления зависимости  $I_{эм} = f(U_a)$  несовпадение кривых соответствующих переднему и заднему фронтам импульса свидетельствуют с одной стороны о необходимости последующего совершенствования процедуры обработки сигналов, а с другой – о возможном наличии быстропротекающих процессов, влияющих на эмиссионную способность катода. Последнее обстоятельство открывает качественно новые подходы к исследованиям эмиссионных систем.

## Литература

1. Добрецов, Л. Н. Эмиссионная электроника. [Текст] / Л. Н. Добрецов, М. В. Гомоюнова. – М. : Наука, 1966. – 564 с.
2. Светцов, В. И. Физическая электроника и электронные приборы [Текст] : учеб. пособие / В. И. Светцов, И. В. Холодков ; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2008. – 494 с.
3. Энергетическая структура электронов в высокотемпературных катодных материалах на основе гафната бария [Текст] / А. П. Кислицын, А. А. Таран, С. И. Планковский, Д. Д. Несмелов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та. – 2008. – Вып. 4 (55). – С. 171–179.
4. Кислицын, А. П. Распределение температуры в активном слое оксидного катода при непрерывном и импульсном токоотборах [Текст] / А. П. Кислицын, С. Ю. Подгорский, А. А. Таран // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 3 (90). – С. 47–55.
5. Мойжес, Б. Я. Физические процессы в оксидном катоде [Текст] / Б. Я. Мойжес. – М. : Наука, 1968. – 480 с.

6. Влияние режима отбора тока с металлопористых термоэлектронных катодов на их эмиссионные характеристики [Текст] / А. В. Морозов, А. Б. Киселев, С. Е. Рожков, Н. Ф. Демидов // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1967. – № 10. – С. 128 – 132.

7. Mills, W. P. C. A computer-controlled measurement system for testing thermionic cathodes [Text] / W. P. C. Mills, P. E. Mead & C. B. Maloney // International Journal of Electronics. – 1971. – Volume 31, Issue 2. – P. 145–147.

8. ГОСТ 21011.7–80. Кенотроны высоковольтные. Методы измерения тока эмиссии [Текст]. – Введ. 1981–01–07. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 5 с.

9. ГОСТ 21011.2–76. Кенотроны высоковольтные. Методы измерения тока анода в импульсе [Текст]. – Введ. 1977–01–07. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.

10. Солонинко, Е. П. Измерительный безынерционный комплекс для определения эмиссионных свойств термоэмиссионных материалов [Текст] /

Е. П. Солонинко // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – № 2 (61). – С. 24 – 30.

11. Лоян, А. В. Расчет вольт-амперных характеристик диодного промежутка в режиме одного импульса при испытаниях эмиттеров катодов электрореактивных двигателей [Текст] / А. В. Лоян, Е. П. Солонинко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 4 (101). – С. 83 – 87.

12. Чижиков, А. Е. Исследование возможности получения неискаженной вольт-амперной характеристики р-п перехода полупроводниковых структур [Текст] / А. Е. Чижиков, С. Б. Ильичев, А. А. Поворинский // Вестник РГРТУ, Рязань. – 2011. – № 3(37). – С. 97 – 100.

13. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов. Учебник для вузов [Текст] / А. Б. Сергиенко. – СПб.: ООО «Питер Принт», 2002. – 604 с.

14. Солонина, А. И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов [Текст] / А. И. Солонина, Д. А. Улахович, Л. А. Яковлев. – СПб.: БХВ Петербург, 2001. – 464 с.

Поступила в редакцию 20.05.2015, рассмотрена на редколлегии 18.06.2015

## ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕМІСІЙНОГО СТРУМУ ВІД АНОДНОЇ НАПРУГИ ЗА ОКРЕМИМ ІМПУЛЬСОМ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

О. П. Кислицын, А. О. Таран

Наведено результати досліджень, які спрямовано на визначення емісійних характеристик термокатода за одноразовим імпульсом високої анодної напруги у експериментальному вакуумному діоді. Встановлено можливість визначення залежності емісійного струму від анодної напруги на основі вимірюваних залежностей від часу напруги та струмового відгуку на фронтах імпульсу. Запропонований метод не протерчить існуючим стандартам вимірювання емісійних характеристик катодів та дозволяє їх контролювати під час швидкоплинних процесів.

**Ключові слова:** термокатод, емісійні властивості, імпульсні вимірювання, окремий імпульс, струмовий відгук.

## RECOVERY OF THE EMISSION CURRENT DENSITY – ANODE VOLTAGE DEPENDENCE BY USE OF THE SINGLE HIGH VOLTAGE PULSE

О. P. Kyslytsyn, A. O. Taran

Investigations results of thermionic cathode emission characteristics by use of the single high anode voltage pulse in the experimental diode are presented. The possibility of cathode emission current – anode voltage dependence determination based on controlled time dependences of anode voltage and current response on the pulse edges was established. Suggested method is not at variants present standards of the thermionic cathodes emission characteristics measuring. This method allows to control these characteristics under fast processes.

**Key words:** thermionic cathode, emission properties, pulse measuring, single pulse, current response.

**Кислицын Александр Петрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: apkyslytsyn@mail.ru.

**Таран Анатолий Алексеевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: anatoliytaran@rambler.ru.