

УДК 537.533+621.3.038.612

© В. Э. Птицын, Б. В. Бардин, Н. А. Волкова,  
В. А. Демидов, А. Г. Монаков

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕРМОПОЛЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Приведено описание системы автоматизации исследований эмиссионных свойств термополевых источников электронов. Апробация разработанной системы на ZrO/W-гетероструктурах показала, что система автоматизации полностью отвечает заданным техническим требованиям. Использование системы автоматизации для исследований эмиссионных свойств ZrO/W-гетероструктур позволило впервые экспериментально показать, что при определенных условиях с поверхности таких структур возможна стабильная термополевая эмиссия потока электронов, обладающего сверхвысокой приведенной яркостью.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве источника электронов в приборах растровой электронной микроскопии, а также в установках электронной литографии широко используются так называемые Шоттки- (Schottky) катоды на основе ZrO/W-гетероструктур. Шоттки-катод представляет собой W-иглу, на вершине которой методом эпитаксии сформирован примерно монокристаллический слой ZrO. Линейные размеры вершины Шоттки-катада (иглы) обычно составляют  $\sim(0.5-1.0)$  мкм. Рабочая температура  $T_s$  поверхности Шоттки-катада составляет  $\sim 1800$  К, а напряженность поля  $E_s$  на эмиттирующей поверхности находится в пределах от  $\sim 0.1$  В/нм до  $\sim 0.8$  В/нм. Процесс эмиссии с поверхности Шоттки-катада отличается высокой стабильностью. Время жизни таких катодов в непрерывном режиме эмиссии составляет  $\sim 2000$  (и более) часов. Приведенная яркость электронных пучков  $\beta$ , формируемых электронно-оптическими системами (ЭОС) с Шоттки-катодом, достигает  $\sim 10^4$  А/(см<sup>2</sup>·ср·В) [1]. Указанные значения приведенной яркости электронного пучка в настоящее время принято считать максимальными.

Однако для решения ряда современных проблем науки и технологии необходимо использовать электронные пучки, у которых  $\beta$  составляет  $\sim(10^5-10^6)$  А/(см<sup>2</sup>·ср·В). Среди проблем, требующих для своего решения электронных пучков со сверхвысокими значениями  $\beta$ , в частности, можно отметить следующие.

1. Разработка и создание установок электронной литографии, позволяющих осуществлять непосредственное (безрезистивное, или "сухое") глубокое травление и модификацию поверхности полупроводников и металлов в результате процес-

са электронной абляции. Такой механизм [2] травления и модификации поверхности конденсированных сред электронным пучком представляет значительный интерес для решения современных задач микромеханики и микроэлектромеханики по созданию 2D и 3D микро- и наноструктур сложных конфигураций [3].

2. Создание мощных "точечных" источников рентгеновского излучения и лазеров на свободных электронах [4].

3. Инжекция ядерного топлива в плазменные установки по моделированию процессов УТС [5] методом воздействия на дейтерий—третиевые капсулы электронных пучков со сверхвысокими уровнями  $\beta$ .

4. Формирование кристаллических наноструктур на поверхности конденсированных сред под действием электронных пучков с высокими уровнями плотности мощности и приведенной яркости [6].

Так как для ЭОС с Шоттки-катодом значение  $\sim 10^4$  А/(см<sup>2</sup>·ср·В) является предельным, то единственная [7] возможность значительного повышения  $\beta$  пучка заключается в использовании в качестве электронного источника ЭОС катода с более высокой эмиссионной способностью.

Решение этого вопроса на первый взгляд представляется очевидным и заключается в том, чтобы (ничего не меняя в ЭОС с Шоттки-катодом) "просто" повысить потенциал экстракции  $V_e$ . Повышение потенциала  $V_e$  приведет к росту  $E_s$  и соответственно вызовет переход эмиссионного процесса в режим термополевой эмиссии (TFE), в котором, как известно, плотность тока эмиссии достигает значений  $\sim(10^6-10^7)$  А/см<sup>2</sup>. При таких уровнях плотности тока эмиссии формирование электронного пучка с необходимыми уровнями

$\beta$  ( $\sim(10^5-10^6) \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{V})$ ) является вполне осуществимой технической задачей.

Однако вышеуказанными действиями желаемого результата достичь не удастся. Это объясняется тем, что в режиме TFE вследствие активации процесса поверхностной самодиффузии структура и топология поверхности вершины острейного эмиттера электронов (термополевого источника) становятся нестабильными [8]. В связи с эволюцией формы и структуры эмиттирующей поверхности при фиксированных значениях  $V_e$  и  $T_s$  ток эмиссии становится неустойчивым. В зависимости от физических условий (работы выхода гетероструктуры  $\phi$ ,  $V_e$  и  $T_s$ ) инкремент нарастания неустойчивости (при больших плотностях тока эмиссии) может изменяться в достаточно широком диапазоне абсолютных значений (от  $\sim 1 \text{ нс}$  до  $\sim 10^3 \text{ с}$ ).

Указанные особенности процесса TFE существенно затрудняют проведение исследований этого явления традиционными (для электронной микроскопии) методами, когда процесс измерения и регистрации данных обычно занимает несколько минут.

Как представляется, именно эффект нестационарности процесса TFE привел к такому положению, что проблема получения электронных пучков со сверхвысокой приведенной яркостью до сих пор остается нерешенной.

Принимая во внимание все вышеизложенное, целью настоящей работы ставилось устранить неизбежные и весьма значительные погрешности, которыми отягчен традиционный метод исследований

явления TFE (вследствие изменения состояния объекта исследований за время измерений). Для решения указанной задачи была разработана система автоматизации измерений основных эмиссионных параметров и характеристик процесса TFE.

## 1. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕРМОПОЛЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Система автоматизации (СА) предназначена для проведения измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) и параметров временной стабильности термополевых источников электронов (ТИЭ) в различных физических условиях и записи полученной информации в память компьютера.

### 1.1 Состав системы автоматизации

Функциональная схема СА приведена на рис. 1. В состав СА входят: высоковольтный источник напряжения (ВВИН) типа HW30, источник питания (ИП), блок управления (БУ), компьютер.

Напряжение 1.5–30 кВ подается на анод вакуумного диода с выхода ВВИН. Величина этого напряжения пропорциональна управляющему напряжению на входе ВВИН, которое должно быть в пределах от 0 В до 10 В. Кроме того, ВВИН имеет выход монитора напряжения (МН), на котором формируется напряжение в диапазоне от 0 В до 10 В, пропорциональное напряжению на аноде вакуумной камеры. Данный выход предназначен для контроля за работой ВВИН.

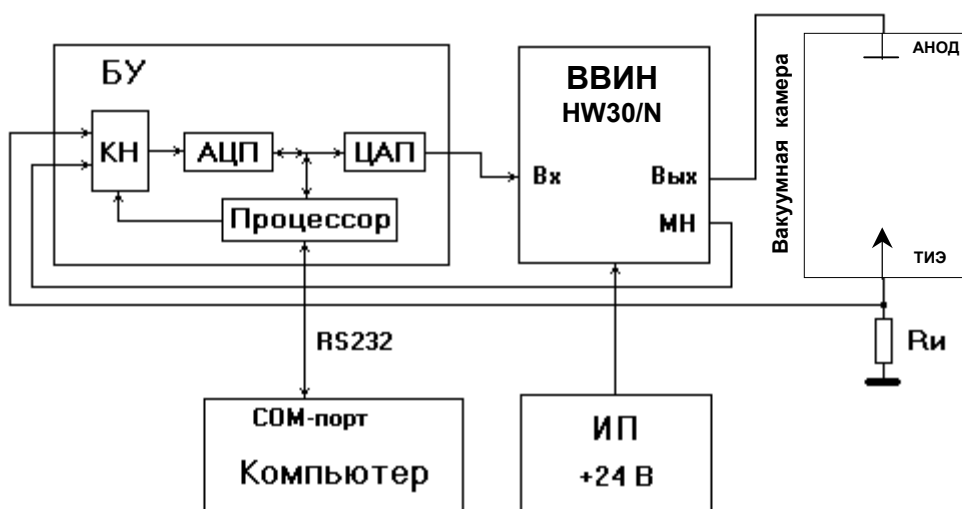


Рис. 1. Блок-схема системы автоматизации

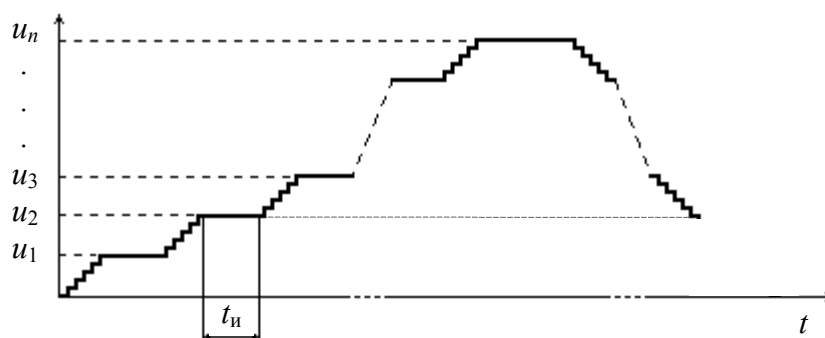


Рис. 2. Временная диаграмма напряжения на аноде при регистрации ВАХ

Для измерения тока эмиссии используется резистор  $R_i$ , на котором создается падение напряжения, пропорциональное этому току. Напряжение первичного питания ВВИН +24 В поступает с ИП.

В состав БУ входят: процессор, управляющий работой остальных узлов БУ, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с коммутатором напряжения (КН) на входе. БУ связан с управляющим компьютером при помощи интерфейсного канала RS232 через СОМ-порт компьютера.

ЦАП формирует управляющее напряжение ВВИН в диапазоне от 0 до 10 В.

АЦП через КН производит измерение эмиссионного тока (напряжение на  $R_i$ ) или напряжения на выходе МН ВВИН.

Программное обеспечение (ПО) СА включает исполняемый файл Cathode.exe и два файла конфигурации — SysPar.cnf и ParRegVAF.cnf. ПО работает в среде ОС Windows 95 или Windows 98 и легко может быть адаптировано в среду ОС Windows XP.

## 1.2. Описание работы системы автоматизации

В процессе регистрации ВАХ по программе Cathode последовательно задаются напряжения  $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$  на аноде вакуумного диода. При этом с целью сглаживания переходных процессов переход к очередному значению напряжения выполняется не скачком, а плавно — небольшими шагами (ступеньки на рис. 2).

После установки очередного напряжения производится измерение тока эмиссии в течение времени  $t_n$ . При этом для снижения влияния шумов и помех производится фильтрация измеренной информации. Для этого выполняется многократный запуск АЦП (до 4000 раз). С целью устранения влияния импульсных помех, которые могут проявляться в форме скачков от среднего значе-

ния, половина полученных значений отбраковывается: 25 % максимальных и 25 % минимальных значений отбрасываются из полученного набора значений. Это осуществляется с использованием операции сортировки данных. Оставшаяся половина значений усредняется. Промежуток времени  $t_n$  определяется "окном" фильтра — числом запусков АЦП и периодом запуска процессора, который в свою очередь запускает АЦП. Период запуска устанавливается оператором и не может быть меньше 2 мс.

По истечении времени  $t_n$  производится переход к следующему значению напряжения. После прохождения всех заданных точек ВАХ осуществляется плавный возврат выходного напряжения ВВИН к исходному значению.

Исследование временной стабильности тока эмиссии производится при постоянном напряжении на аноде вакуумного диода. В этом случае выполняется плавная установка экстрагирующего напряжения, после чего производится периодическое измерение тока с заданным периодом. Соответствующими установками необходимо обеспечить, чтобы время измерения  $t_n$  не превышало периода измерения.

Так как продолжительность данного эксперимента не ограничивается, то с целью предотвращения переполнения памяти компьютера, а также с целью снижения ущерба при возникновении аварийной ситуации (например, пропадании напряжения питания) периодически производится автоматическое сохранение данных эксперимента в файле "BuffFunc.dat" на жестком диске.

При тестировании аппаратуры и в отладочных экспериментах может потребоваться контроль выходного напряжения ВВИН. С этой целью могут быть проведены эксперименты, аналогичные вышеописанным. Однако в этом случае измеряемым сигналом является напряжение на выходе МН, а не ток через резистор  $R_i$ .

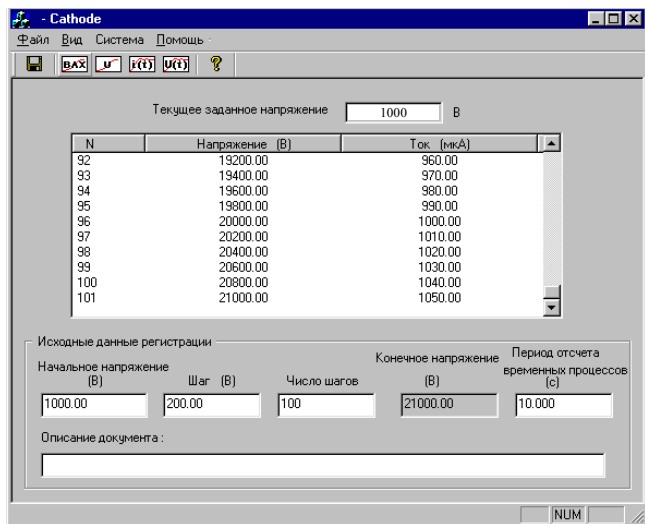


Рис. 3. Вид основной панели программы Cathode

При сохранении данных эксперимента на диске в процессе выполнения соответствующей опции автоматически создаются два файла: файл числовых результатов эксперимента с расширением ".dat" и текстовый файл условий проведения эксперимента и сопроводительной информации с расширением ".txt". Формат данных файла "\*.dat" воспринимается большинством стандартных программ обработки данных, таких как Excel, Origin и др.

### 1.3. Конфигурирование системы автоматизации

Конфигурирование системы производится в пункте меню "Система/Системные параметры". При активизации этого пункта вызывается диалоговая панель "Системные параметры", приведенная на рис. 4. В окне "СОМ-порт" выбирается номер СОМ-порта компьютера — СОМ1 или СОМ2. Остальные параметры вводятся в соответствующих окнах редактирования.

Параметр "Дискрет" аппаратных каналов рассчитывается, исходя из диапазона задаваемой или измеряемой величины соответствующего канала, а также учитывая разрядность ЦАП или АЦП (см. рис. 1), которая в обоих случаях составляет 16 бит. Этот параметр имеет смысл масштабного коэффициента. По результатам калибровки каналов при помощи внешних приборов этот параметр может быть откорректирован с целью компенсации погрешностей аппаратуры. Если в результате калибровки будет выявлено наличие погрешности типа "смещение нуля", то это может быть отображено

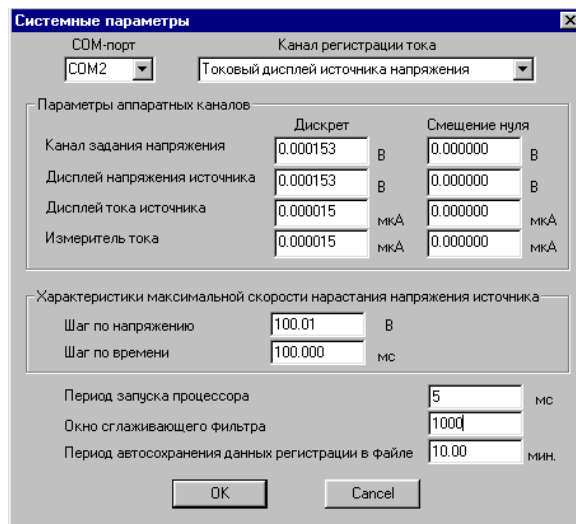


Рис. 4. Диалоговая панель "Системные параметры"

в соответствующем окне редактирования (с целью последующего автоматического учета в процессе выполнения измерительных операций).

Параметры "Характеристики максимальной скорости нарастания напряжения источника" определяют скорость плавного изменения напряжения (см. рис. 2). Смысл остальных параметров понятен из описания в подразделе 1.2.

### 1.4. Перечень экспериментов, осуществляемых с помощью СА

В перечне основных экспериментов, обеспечиваемых системой автоматизации, следующие:

- 1) регистрация (**ВАХ**) вольт-амперной характеристики — зависимости тока эмиссии от задаваемого программой напряжения;
- 2) регистрация (**u**) зависимости напряжения на выходе ВВИН (см. рис. 1) от напряжения, задаваемого программой;
- 3) регистрация (**i(t)**) зависимости тока эмиссии от времени;
- 4) регистрация (**u(t)**) зависимости напряжения на выходе ВВИН от времени.

Исходные данные проведения эксперимента вводятся в соответствующие окна редактирования в нижней части основной панели "Исходные данные регистрации" (см. рис. 3). При регистрации "ВАХ" (эксперимент 1), а также при эксперименте 2 вводятся: начальное напряжение, шаг напряжения между точками ВАХ и число шагов. Конечное напряжение программа рассчитывает сама и отображает в соответствующем окне.

При исследовании временной стабильности (эксперименты 3 и 4) в окне "Начальное напряжение" вводится задаваемое напряжение — оно в данном случае является постоянным (единственным), а также вводится период отсчета временных процессов. Данные, введенные в других упомянутых выше окнах, не влияют на ход данного эксперимента.

В окне редактирования "Описание документа" может быть введен любой сопроводительный текст, который сохраняется в соответствующем файле "\*.txt" при выполнении команды сохранения документа.

Любой эксперимент запускается соответствующей кнопкой на панели инструментов основной панели (см. рис. 3).

В ходе эксперимента задаваемые и измеренные величины отображаются в окне-таблице в средней части панели (рис. 3). В окне "Текущее заданное напряжение" отображается значение напряжения также и во время его плавного изменения.

Сохранение результатов эксперимента в файле производится в пункте меню "Файл/Сохранить как..." с использованием стандартного для Windows-программ диалогового окна.

### 1.5. Средства тестирования системы автоматизации

Возможность проведения наладочных и проверочных экспериментов с использованием осциллографа обеспечивается в пункте меню "Система/Тесты", в котором вызывается окно команд, приведенное на рис. 5.

Кнопкой "Запуск ВАХ" запускается непрерывный цикл эксперимента 1, кнопкой "Запуск измер. Напр." — цикл эксперимента 2. Кнопка "Стоп" останавливает цикл. Выход из окна команд производится кнопкой "ОК".

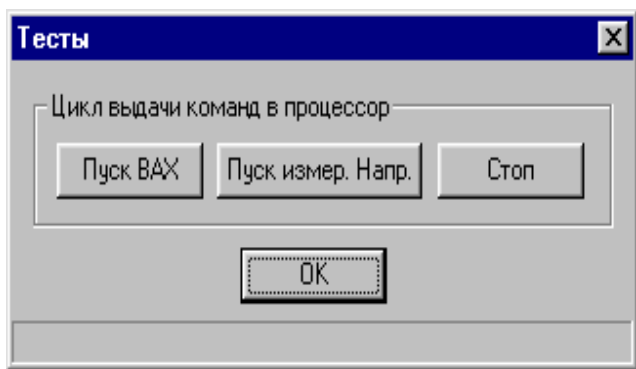


Рис. 5. Окно команд в режиме тестирования системы автоматизации

## 2. АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ: ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ZrO/W В УСЛОВИЯХ TFE

Для апробации СА на конкретном физическом объекте были выполнены эксперименты с ZrO/W-гетероструктурами в форме острых эмиттеров. Наряду с испытаниями и проверкой параметров СА ставилась также конкретная физическая задача исследования эмиссионных свойств указанной гетероструктуры в условиях TFE.

Прежде всего следует отметить, что разработанная система автоматизации продемонстрировала высокую работоспособность и в полной мере отвечала всем техническим требованиям.

Кроме того, использование разработанной СА для исследования эмиссионных свойств ZrO/W-гетероструктур позволило получить оригинальные данные о физике эмиссионных процессов в условиях TFE. Некоторые из полученных результатов показаны на рис. 6 и 7.

Однозначно показано, что при высоких температурах  $T_s \sim 1500\text{--}1800\text{ K}$  в сильных электрических полях, соответствующих режиму TFE, структура и топология исследованной ZrO/W-гетероструктуры изменяется во времени, что отвечает представлениям, изложенным во Введении. Как легко видеть из рис. 6, при последовательном измерении ВАХ каждая последующая ВАХ располагается над предыдущей. Из этого факта, в частности, следует, что на вершине иглы формируется микрокристалл. Увеличение полного тока эмиссии происходит вследствие возрастания во времени фактора поля (на стыках плотноупакованных граней).

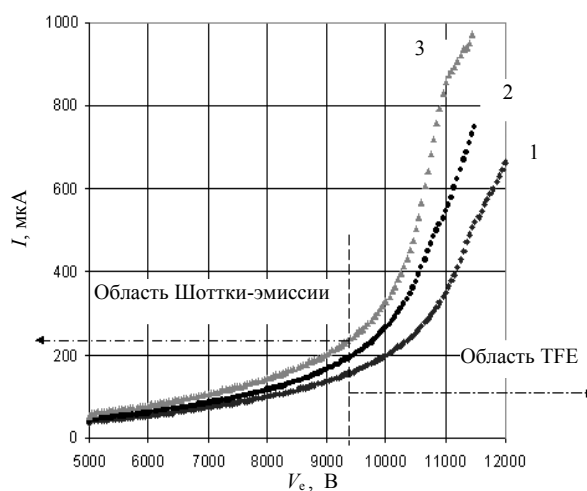
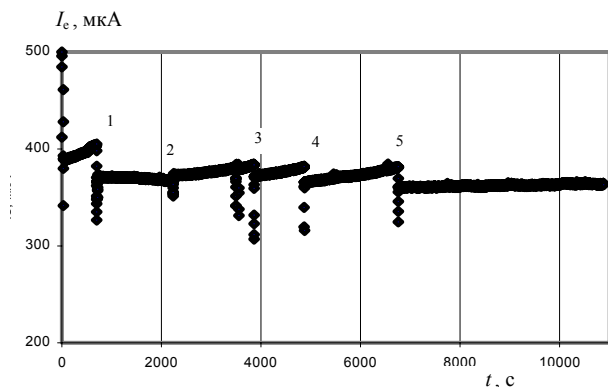


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики ZrO/W-гетероструктуры. Кривые 1, 2, 3 получены в результате трех последовательных (автоматизированных) процессов измерения ВАХ



**Рис. 7.** Зависимость тока эмиссии с поверхности ZrO/W-гетероструктуры от времени в условиях TFE для фиксированного значения потенциала экстракции. В моменты времени, отмеченные точками 1, 2, 3, 4 и 5, производились специальные направленные изменения ("вариации") исходных физических условий ( $T_s$  и  $E_s$ )

Анализ ВАХ (рис. 6) показал также, что результирующая ВАХ состоит из двух участков — начального участка, который описывается уравнением для Шоттки- (и Extended Schottky) эмиссии, и затем эмиссионный процесс переходит в режим TFE (второй участок), который вполне корректно описывается уравнением Мерфи—Гуда [8].

Результаты измерений зависимости полного тока эмиссии в условиях TFE от времени (для той же самой ZrO/W-гетероструктуры) показаны на рис. 7. Как видно из экспериментальной кривой (рис. 7), при фиксированном значении потенциала экстракции  $V_e$  ток эмиссии в общем случае является нестационарным. Однако при определенных физических условиях по истечении достаточно большого промежутка времени ( $\sim 2$  ч, точка 5) ток эмиссии становится стабильным (нестабильность тока меньше  $\sim 0.1\%$ ). Отметим здесь, что, вообще говоря, при фиксированных значениях потенциала экстракции  $V_e$  и температуры  $T_s$  поверхность ZrO/W-гетероструктуры "сама по себе" не способна за конечное время самосогласованным образом перейти в состояние со стабильным током TFE. В связи с этим для того, чтобы процесс формовки устойчивой стабильной формы эмиттирующей поверхности занимал конечное время, необходимо варьировать физические условия на стадии формовки вершины эмиттера.

Изучение формы поверхности ZrO/W-микроструктуры в растровом электронном микроскопе, а также теоретический анализ показали, что стабильность тока эмиссии в режиме TFE имеет место только после того, как эмиттирующая поверхность трансформируется в поверхность с мини-

мальной свободной поверхностной энергией (для микроструктуры соответствующей сингонии).

Используя полученные данные (рис. 6 и 7), а также результаты электронно-микроскопического изучения микрогеометрии вершины ZrO/W-микроструктуры, были выполнены расчеты численного значения приведенной яркости  $\beta$ , которой обладает эмиттер в условиях TFE. По сравнению с Шоттки-катодом разработанный TFE-катод (или ТПИ) характеризуется сверхвысокой приведенной яркостью  $\beta \sim (5-6) 10^5$  А/(см<sup>2</sup>·ср·В).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана, создана и апробирована система автоматизации исследований эмиссионных свойств термодневных источников электронов.

2. Изучение эмиссионных свойств ZrO/W-гетероструктур с помощью разработанной системы автоматизации позволило впервые показать, что:

- исследованные гетероструктуры обладают сверхвысокой приведенной яркостью в условиях TFE и
- высокая стабильность тока в режиме TFE достигается только тогда, когда эмиттирующая поверхность является поверхностью с минимальной свободной поверхностной энергией для заданных физических условий ( $T_s$ ,  $E_s$ ).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 02-02-17268 а)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fransen M.J., Overwijk M.H.F., Kruit P. Brightness Measurements of a ZrO/W Schottky Emitter in a Transmission Electron Microscope // Applied Surface Science. 1999. V. 146. P. 357–362.
2. Птицын В.Э. Феноменологическая модель начальной стадии развития процесса электронной абляции металлов // ДАН. 2003. Т. 32, № 5. С. 623–626.
3. Лучинин В.В. Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 1. С. 3–18.
4. Brau C.F. High-Brightness Electron Beams — Small Free-Electron Lasers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A. 1998. V. 407. P. 1–7.
5. Tsai C.C., Foster C.A., Milora S.L., Schechter D.E., and Whealton J.H. Electron-Beam Rocket Acceleration of Hydrogen Pellets // J. Vac. Sci. Technol., A. Jul./Aug., 1993. V. 11, N 4. P. 1252–1257.

6. *Klimenkov M., Matz W., Nepijko S.A., Lehman M.* Crystallisation of Ge Nanoclusters in SiO<sub>2</sub> Caused by Electron Irradiation in TEM // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B.* 2001. V. 179. P. 209–214.
7. *Силадьи М.* Электронная и ионная оптика (пер. с англ.). М.: Мир, 1990. 640 с.
8. *Ptitsin V.E.* Non-Stationary Thermal Field Emission // *Advances in Imaging and Electron Physics* / Ed. P.W. Hawkes. Academic Press, 2000. V. 112. P. 165–231.

*Институт аналитического приборостроения РАН,  
Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 15.10.2004.

## **AUTOMATION SYSTEM FOR THERMAL FIELD ELECTRON EMISSION STUDIES**

**V. E. Ptitsin, B. V. Bardin, N. A. Volkova,  
V. A. Demidov, A. G. Monakov**

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

The paper presents a system for automation of thermal field electron source emission studies. The system tests on ZrO/W heterostructures have shown that the developed automation system completely meets the specified technical requirements. The experiments on studying the emission properties of ZrO/W heterostructures based on this automation system have for the first time demonstrated that at certain conditions these structures are capable of stable thermal field emission of ultrahigh brightness electron beams.