

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 537.533.2

© В. Э. Птицын, С. В. Максимов

## ТЕРМОПОЛЕВОЙ КАТОД С ДВОЙНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ ЭМИССИИ

Работа посвящена одному из ключевых аспектов проблемы формирования субмикронных электронных зондов с высокой плотностью мощности ( $> 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) — разработке физической технологии создания термополевых источников электронов с высокой электронной яркостью и угловой интенсивностью эмиссии. Проведен обзор современного состояния исследований и существующих методов повышения эмиссионной способности термополевых катодов. Разработана оригинальная физическая технология формирования эмиттирующей поверхности термополевых эмиттеров с уникальными эмиссионными параметрами.

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, для изучения поверхности вещества в настоящее время широко используются различные электронно-зондовые приборы: растровые и просвечивающие растровые электронные микроскопы, микрозондовые Оже-спектрометры, рентгеновские микроанализаторы. Перечисленные приборы позволяют получать практически исчерпывающую информацию о физико-химических свойствах поверхности конденсированного вещества и протекающих на ней процессах на атомном и субатомном уровнях. В качестве источника электронов в этих приборах в последние десятилетия обычно используют различные типы автоэмиссионных (или, более корректно, термополевых) катодов, которые, благодаря малому диаметру ( $d_c$ ) виртуального источника ( $d_v \sim 20$  нм) и весьма узкому энергетическому распределению эмиттируемых электронов (десятые доли эВ), позволяют формировать на поверхности исследуемого объекта субмикронный зонд с током порядка  $I_b \sim 1-10$  нА. Плотность мощности ( $P_b$ ) такого зонда на поверхности образца-мишени обычно не превышает (или много меньше)  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

В результате существенного прогресса, достигнутого в последнее десятилетие в таких областях знаний как физическая электроника, физика взаимодействия концентрированных потоков энергии с конденсированным веществом и физика поверхности, возможности приложений субмикронных электронных зондов значительно расширились как в научном, так и в прикладном аспектах.

В частности, в этих исследованиях было установлено, что при взаимодействии с поверхностью конденсированного вещества интенсивных электронных пучков с плотностью мощности порядка  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и выше возбуждается фазовый переход конденсированного вещества в плотную плазму. Это явление по своей физической природе в значительной мере аналогично явлению лазерной аб-

ляции, которое в настоящее время интенсивно исследуется и уже нашло широкое применение как в научных, так и в прикладных разработках.

Имея в виду вышесказанное, большой интерес представляет создание электронно-оптических систем (ЭОС), способных формировать на поверхности образца-мишени субмикронные электронные зонды, обладающие высоким уровнем плотности мощности  $P_b > 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и, одновременно, сравнительно низкой энергией ( $E$ ) электронов в зонде (порядка 10 кэВ).

Создание ЭОС, позволяющих формировать электронные пучки с указанными параметрами, позволит приступить к практическому решению ряда актуальных научных и технологических проблем [1, 2], таких как:

а) моделирование и осуществление технологических процессов по глубокому профилированию и модифицированию структур микроэлектроники и микромеханики при прямом воздействии на поверхность конденсированного вещества электронным пучком с высокой плотностью мощности,

б) создание точечных источников рентгеновского излучения с плотностью мощности излучения до  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>,

в) осуществление процесса десорбционной ионизации отдельных атомов а также нефрагментированных молекулярных ионов сложных химических соединений под воздействием интенсивных электронных пучков в целях проведения масс-спектрометрического анализа в биомедицине, в фармакологии и др.,

г) получение фуллеренов при прямом воздействии электронного пучка на поверхность углеродной мишени, и, наконец,

д) моделирование и возбуждение процессов ядерного синтеза в лабораторных условиях при взаимодействии высокоинтенсивных электронных пучков с мишенями, насыщенными дейтерием и тритием.

Для формирования субмикронного потока электронов с плотностью мощности более  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> источник электронов (катод) ЭОС должен обладать высокой электронной яркостью ( $B$ ) и угловой интенсивностью эмиссии ( $\tilde{I}$ ). Численную оценку необходимых значений для  $\tilde{I}$  легко получить, используя результаты анализа обобщенной модели ЭОС с термополевым источником электронов [3]. Выражение, связывающее между собой уровень  $P_b$  с параметрами линз ЭОС, формирующей электронный зонд, и величиной  $\tilde{I}$ , характеризующей непосредственно эмиссионные свойства катода ЭОС, можно записать в виде

$$P_b = J_b \cdot V_a \approx \frac{6.6 \cdot V_a^{5/4}}{\pi \cdot V_e^{1/4} \cdot C_1^{1/2} \cdot C_2^{1/6} \cdot \rho^{4/3}} \cdot \frac{dI}{d\Omega}, \quad (1)$$

где  $V_a = E/e$  — ускоряющее напряжение объективной линзы ЭОС,  $e$  — заряд электрона,  $V_e$  — эмиссионное (или экстрагирующее) напряжение,  $C_1$  и  $C_2$  — соответственно, коэффициенты сферической aberrации линз электронной пушки и объективной линзы ЭОС,  $\rho$  — радиус зонда на поверхности образца-мишени,  $\frac{dI}{d\Omega} \equiv \tilde{I}$  — угловая интенсивность эмиссии, равная отношению элемента полного тока  $dI$ , эмиттируемого в пределах телесного угла  $d\Omega$ . Из феноменологического выражения (1) следует, что при заданных значениях  $\rho$  и  $E$  уровень плотности мощности зонда, в основном, определяется двумя параметрами, а именно,  $C_1$  и  $\tilde{I}$ .

Проделав вычисления по выражению (1), получим, что ЭОС со средними значениями коэффициентов  $C_1 \sim C_2 \sim 1$  см способна сформировать электронный зонд радиусом  $\rho \leq 1,0$  мкм, энергией электронов в зонде  $E \sim 10$  кэВ и с плотностью мощности  $P_b > 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> при условии, что угловая интенсивность эмиссии катода удовлетворяет неравенству  $\tilde{I} \geq 10^{-2}$  А/ср. При таких значениях  $\tilde{I}$  другие эмиссионные параметры катода, такие как  $B$  и плотность тока эмиссии ( $J$ ) должны составлять, соответственно,  $B \sim 10^{10}$  А/(см<sup>2</sup>·ср) и  $J \geq 10^6$  А/см<sup>2</sup>. Отметим, что необходимые оценки для  $B$  и  $J$  легко проделать по известным соотношениям [4]

$$B = e \frac{JV_e}{\pi E_r} = \frac{4\tilde{I}}{\pi d_v^2}, \quad (2)$$

где  $E_r$  — среднее значение тангенциальной составляющей энергии эмиттируемых электронов,  $d_v$  — диаметр виртуального источника.

Анализ литературных данных, включая патентный поиск по сети Internet, показал, что физи-

ческая технология воспроизводимого получения термополевых катодов, обладающих в режиме стационарной эмиссии электронов столь высокими значениями  $B$  и  $\tilde{I}$ , до настоящего времени окончательно не разработана.

Таким образом, из вышесказанного следует, что для решения проблемы формирования низкоэнергетического субмикронного электронного зонда с высокой плотностью мощности ( $P_b > 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) необходимо, во-первых, определить метод (методы) минимизации коэффициента сферической aberrации электронной пушки ЭОС и затем найти соответствующие технические решения для их практической реализации и, во-вторых, обосновать и разработать технологию, которая бы позволяла создавать источники электронов — катоды, обладающие значительно более высокой электронной яркостью и угловой интенсивностью эмиссии по сравнению с эмиссионными параметрами, которыми обладают разработанные к настоящему времени источники электронов

Что касается первого аспекта проблемы, то некоторые новые подходы и методы ее решения были найдены и изложены в [5].

Относительно второго аспекта этой проблемы необходимо отметить, что ряд представлений и методов, положенных в основу физической технологии создания термополевых катодов нового поколения, был предложен и развит в работах [2, 6]. В настоящей статье кратко изложены результаты проведенных ранее исследований а также сообщаются новые данные, полученные авторами работы за последние два года.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОПЛЕВОВОГО КАТОДА С ДВОЙНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ ЭМИССИИ

### 2.1. Постановка задачи и физические предпосылки создания нового метода увеличения электронной яркости и угловой интенсивности эмиссии термополевых катодов

Согласно теории явления термополевой эмиссии [7] и феноменологическим соотношениям (2), взаимосвязанные эмиссионные параметры термополевого катода ( $B$  и  $\tilde{I}$ ) могут быть существенно увеличены как за счет повышения плотности эмиссионного тока в стационарном режиме эмиссии, так и за счет уменьшения полного угла ( $\Omega$ ), в пределах которого распределяются электроны после акта эмиссии.

При фиксированном значении радиуса кривизны ( $r$ ) эмиттирующей поверхности термополевого катода резкое (экспоненциальное) увеличение  $J$  может происходить [7] либо в результате от-

носителю небольшого роста напряженности поля ( $F_z$ ) на поверхности катода, либо за счет понижения работы выхода ( $\phi$ ) поверхности катода.

Как показано в [2], при прочих равных условиях ( $r$ ,  $\phi$ ) за счет роста  $F_z$ , плотность тока  $J$  в стационарном режиме эмиссии (с поверхности катода со скругленно-сглаженной высокотемпературным прогревом вершиной) можно увеличить только до значений  $J \leq 10^6$  А/см<sup>2</sup>. При дальнейшем повышении напряженности поля развивается неустойчивость тока эмиссии, которая заканчивается вакуумным пробоем и необратимым разрушением катода-эмиттера. Согласно теории этого явления [2], вакуумный пробой происходит вследствие возбуждения в этих условиях взаимосвязанных вторичных термополевых процессов: активированного испарения собственных атомов вещества эмиттера, полевой ионизации испаряющихся нейтралей и интенсивной бомбардировки эмиттера образующимися ионами. Для того, чтобы существенно (на порядки величины) увеличить значение  $J$  в стационарном режиме эмиссии, необходимо выполнить ряд условий:

- концентрация атомов в состоянии двумерного газа (адатомов) на эмиттирующей поверхности должна быть минимальной, в связи с этим энергия связи (или когезии) поверхностных атомов должна иметь возможно более высокое значение;

- $\phi$  поверхности должна быть сравнительно низкой для того, чтобы в процессе эмиссии высоких плотностей тока минимизировать вероятность полевой ионизации нейтральных атомов, образующихся у поверхности эмиттера;

- радиус кривизны поверхности должен быть весьма малым, соизмеримым с характерной длиной свободного пробега по отношению к процессу электрон-фононного рассеяния.

Вышеперечисленным условиям может удовлетворять, например, поверхность плотноупакованной грани кристалла тугоплавкого металла. Эта грань должна иметь возможно более низкое значение  $\phi$ : на этой грани должны отсутствовать ступени, изломы и другие поверхностные дефекты, которые являются "источниками" образования слабосвязанных с поверхностью адатомов. При выполнении этих условий и, дополнительно, при малых радиусах кривизны эмиттирующая поверхность обладает высокой электронной яркостью и может сохранять устойчивость по отношению к процессу возбуждения вакуумного пробоя вплоть до  $J \sim (10^9 - 10^{10})$  А/см<sup>2</sup> [2].

Для уменьшения  $\Omega$  и соответствующего увеличения  $\tilde{I}$  используют различные методы — методы локализации эмиссии в малых телесных углах. Среди этих методов основными являются следующие.

1. Совмещение оси острейшего микрокристалла (МК) с кристаллографическим направлением, в котором происходит наиболее интенсивная эмиссия. Обычно используют три ориентации МК  $W$ :  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 310 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ .

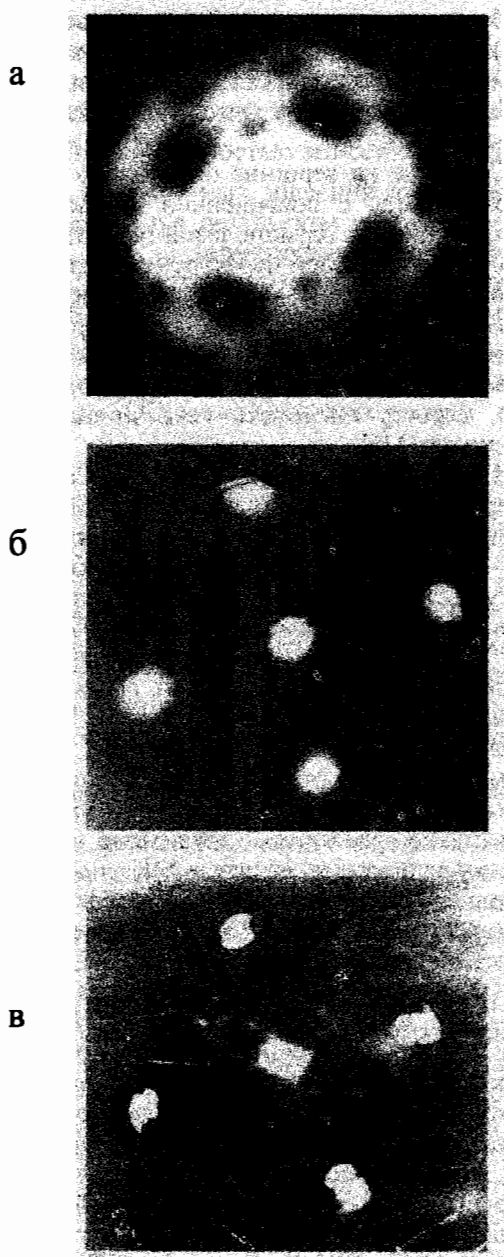
2. Создание на вершине острейшего МК участка поверхности с повышенной кривизной посредством процесса термополевой перестройки [8] — метод "термополевой перестройки". Этот метод позволяет создавать на вершине МК элемент поверхности с высокой кривизной, что приводит к локальному повышению так называемого  $\beta$ -фактора (или полевого множителя [7]) и, соответственно, к росту плотности тока эмиссии в направлении оси МК.

3. Избирательная адсорбция Zr, Hf, Ce, Al, Mg, Ti на вершине МК с целью понижения работы выхода центральной (осевой) грани эмиттера электронов — метод "избирательной адсорбции" [8]. При осуществлении метода "избирательной адсорбции" в качестве исходного МК обычно применяют монокристаллы тугоплавких переходных металлов (как правило, W или Mo), ориентированные в направлении  $\langle 100 \rangle$ .

Первый метод локализации является наиболее простым, но обычно он используется в сочетании со вторым методом, так как это дает возможность дополнительно увеличить локальную кривизну участка поверхности на вершине МК.

Термополевая перестройка вершины МК при осуществлении второго метода локализации производится в сверхвысоком вакууме  $\sim 10^{-7}$  Па в условиях нагрева вершины МК до температуры  $\sim 1500-2200$  К в сильном электрическом поле  $\sim (5-6) \cdot 10^7$  В/см "автоионной" полярности. При этом происходит кристаллическая огранка исходной скругленно-сглаженной высокотемпературным прогревом вершины МК. Так как наибольшая угловая интенсивность наблюдается для стадии термополевой перестройки, при которой эмиссия преимущественно локализуется в направлениях  $\langle 100 \rangle$ , то для создания катодов для ЭОС в большинстве случаев используют МК  $W$ , ориентированные в направлении  $\langle 100 \rangle$ .

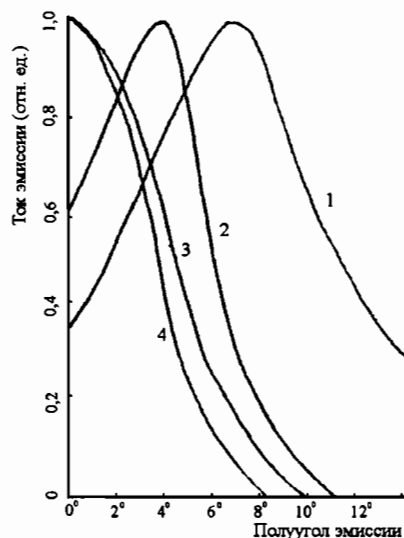
Сравнительный анализ эффективности различных методов локализации эмиссии проделан в [9]. В этих работах было показано, что метод избирательной адсорбции является весьма эффективным методом локализации. Процесс адсорбции электроположительных атомов на поверхность МК проводится в атмосфере кислорода ( $P \sim 10^{-4} - 10^{-6}$  Па). В результате избирательной адсорбции происходит резкое возрастание эмиссионной способности соответствующего локального участка поверхности МК и тем самым создается своеобразное "окно" для преимущественного туннелирования электронов с поверхности МК. Иллюстра-



**Рис. 1.** Иллюстрация метода локализации полевой эмиссии в малом телесном угле: а — эмиссионное изображение поверхности МК W <100> до адсорбции Zr; б — эмиссионное изображение поверхности МК W <100>, сформированной методом избирательной адсорбции Zr; в — эмиссионное изображение поверхности МК W <100>, сформированной методом двойной локализации

ция метода избирательной адсорбции Zr на поверхности МК W <100> показана на рис. 1.

В таблице 1 и на рис. 2 [10] приведены сравнительные количественные данные, характеризующие два различных метода локализации полевой эмиссии в малых телесных углах. Из приведенных в таблице 1 и на рис. 2 экспериментальных данных, на первый взгляд, может показаться, что наиболее эффективным методом локализации эмиссии является метод термополевой перестройки МК W <100>, так как после термополевой перестройки полуугол эмиссии оказывается несколько меньшим (кривые 3, 4; рис. 2), чем для метода избирательной адсорбции Zr. Более того, после термополевой перестройки распределение тока в пучке весьма близко по форме к гауссовой кривой, тогда как после избирательной адсорбции Zr на скругленно-сглаженную вершину МК W <100> в распределении тока эмиссии по углу образуется прогиб или “седло” (рис. 2).



**Рис. 2.** Распределение тока эмиссии в зависимости от полуугла эмиссии:

1 — W <100> (скругленно-сглаженная эмиттирующая поверхность) полный ток эмиссии  $I = 1 \text{ мкА}$ ,  $V_e = 3010 \text{ В}$ ;

2 — ZrO/W<100> катод, изготовленный методом избирательной адсорбции, полный ток эмиссии  $100 \text{ мкА}$ ,  $V_e = 3200 \text{ В}$ ;

3 — W<100> катод, изготовленный методом термополевой перестройки; полный ток эмиссии  $100 \text{ мкА}$ ,  $V_e = 2160 \text{ В}$ ;

4 — W<100> катод, изготовленный методом термополевой перестройки; полный ток эмиссии  $0,1 \text{ мкА}$ ,  $V_e = 854 \text{ В}$

Табл. 1

Относительное изменение эмиттирующей площади ( $S/S_0$ ) и эмиссионного напряжения ( $V_{e0}/V_e$ ), необходимого для эмиссии полного тока в 1мкА для двух различных методов локализации эмиссии

Метод локализации	$S/S_0$	$V_{e0}/V_e$	Работа выхода, эВ
1. Избирательная адсорбция Zr на МК W <100>	$(2,7 \pm 0,2) 10^{-2}$	$0,70 \pm 0,05$	2,7
2. Термополевая перестройка МК W <100>	$(5,0 \pm 0,2) 10^{-3}$	$0,45 \pm 0,05$	4,6

Однако, исследования стабильности эмиссионного процесса показали, что стабильность тока эмиссии с поверхности ZrO/W<100> катодов значительно, примерно на порядок величины, выше, чем у W<100> катода, сформованного в процессе термополевой перестройки. Это обстоятельство существенно снижает достоинства метода термополевой перестройки как самостоятельного метода локализации эмиссии.

Таким образом, из проведенного анализа литературных данных по методам локализации эмиссии в малых телесных углах следует, что каждый из этих методов имеет как свои преимущества, так и недостатки. В связи с этим в [2], было показано, что для получения высокостабильного узкоколлимированного центрального эмиссионного пучка с гауссовым распределением плотности потока электронов в центральном пучке (рис. 1) наиболее перспективным методом локализации термополевой эмиссии может быть комплексный метод, сочетающий термополевую перестройку МК W <100> и избирательную адсорбцию Zr (в атмосфере кислорода) на предварительно перестроенную вершину МК W <100>.

**2.2. Технология формирования эмиттирующей поверхности термополевого катода методом двойной локализации эмиссии.**

Согласно вышеизложенному, перспективным методом локализации эмиссии с поверхности острийных термополевых эмиттеров является комплексный метод локализации, суть которого заключается в последовательном применении двух известных методов локализации: а) метода термополевой перестройки МК W<100> и б) метода избирательной адсорбции Zr на перестроенную поверхность поверхности МК W <100>.

Описанному ниже новому методу локализации термополевой эмиссии было дано [2] специальное название — "метод двойной локализации".

Блок-схема технологического комплекса, разработанного в ИАнП РАН, для формирования эмитти-

рующей поверхности ZrO/W<100> катодов с двойной локализацией эмиссии, приведена на рис. 3. Назначение основных элементов комплекса указано в подписях к этому рисунку. Технологический комплекс создан на основе универсальной промышленной сверхвысоковакуумной установки (УСУ-4). Внутри вакуумной камеры размещалась кассета с восемью катодными блоками, укрепленными на манипуляторе вращения (рис. 4), что позволяло избегать частого развакуумирования установки и последовательно производить операции по термополевой обработке сразу нескольких катодов в одном технологическом цикле. Источником атомов Zr служила калиброванная молекулярная пушка, укрепленная на вводе качания.

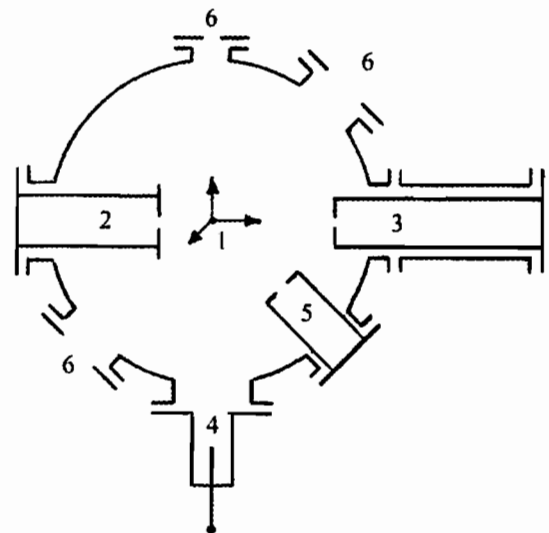


Рис. 3. Блок – схема экспериментального технологического комплекса по формированию эмиттирующей поверхности катодов с двойной локализацией эмиссии.

1 — кассета с 8 катодными блоками; 2 — масс-спектрометр МС-7303; 3 — источник атомов Zr; 4 — высоковольтные вводы с блоками питания; 5 — система напуска кислорода; 6 — окна

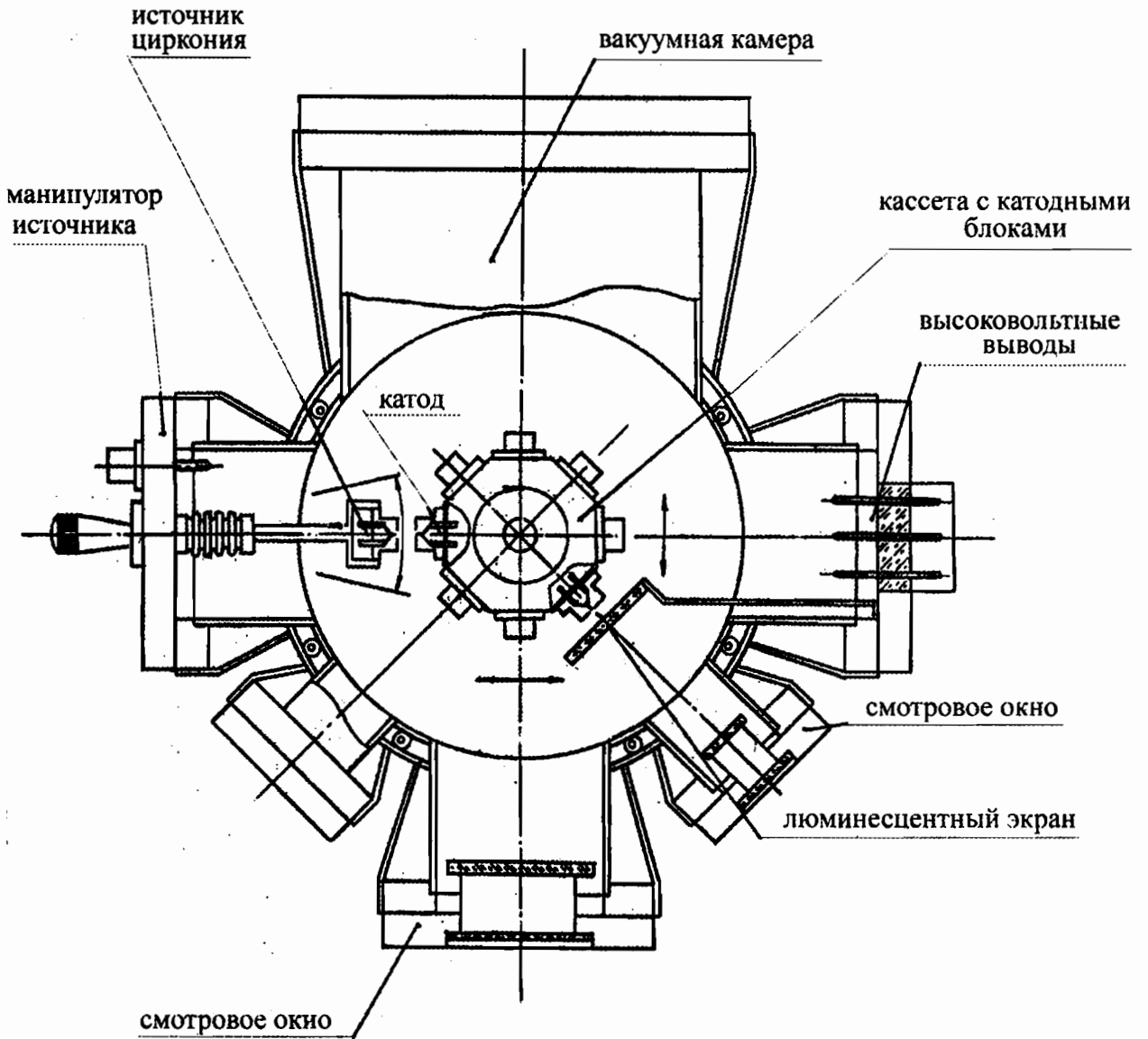


Рис. 4. Фрагмент установки по формированию эмиттирующей поверхности катодов с двойной локализацией эмиссии (вид сверху)

Для ввода в вакуумную камеру газообразного особочистого кислорода использовалась система натекания. Различные стадии процесса термополевой обработки поверхности МК W контролировались как по кривым кинетики эмиссионного тока, так и визуально по эмиссионным изображениям поверхности МК на люминесцентном экране. Для регистрации процессов распыления Zr и напуска в камеру кислорода использовался квадрупольный масс-спектрометр МС-7303.

Перед установкой в вакуумной камере УСУ-4 проводились технологические операции по приварке исходных проволочных или монокристаллических заготовок к поддерживающей W дужке а также операции по электрохимическому травлению. Приварка проволочных или монокристаллических элементов к катодному узлу выполнялась на высокоточном сварочном станке, оснащенный прецизионными микрометрическими манипуляторами и оптическим контрольным оборудованием. Это позволяло осуществлять с точностью не хуже  $\sim 5$  мкм процесс приварки ориентированных в направлении  $\langle 100 \rangle$  монокристаллических W заготовок (с линейными размерами:  $0,1 \times 0,1 \times 10,0$  мм<sup>3</sup>), предварительно вырезанных на электроэрозионном станке из макрокристалла W, выращенного методом зонной плавки.

Процесс предварительного заострения приваренных к дужке W проволок или монокристаллических заготовок проводился известными методами электрохимического травления "в капле" или "в объеме" на специально разработанной для этой операции установке (рис. 5). С целью повышения точности процесса травления установка размещалась на виброамортизаторе и была оснащена микрометрическим манипулятором, использование которого давало возможность осуществлять перемещение исходной заготовки катода в трех плоскостях. Посредством перемещений, контролируемых оптическим микроскопом с приемлемой погрешностью (в единицы микрон), производилось совмещение оси проволочной заготовки и оси симметрии осесимметричного распределения потенциала в объеме капли или в объеме цилиндрической кюветы. Прецизионное позиционирование заготовки перед травлением позволяло с необходимой точностью совмещать ось катода с осью симметрии "полусферической" поверхности, образующейся после перетравливания проволоки или монокристалла W. После травления, перед установкой в камеру УСУ-4, начальная геометрия вершины эмиттера и ее форма определялись с помощью растрового электронного микроскопа МРЭМ-100. Информация о начальной форме и геометрии вершины эмиттера выводилась на экран монитора ЭВМ и затем размещалась в памяти компьютера.

Физическая технология формирования эмиттирующей поверхности катода по методу двойной локализации состояла в следующем. Предварительно, с целью начальной термополевой обработки исходной скругленно-сглаженной высокотемпературным прогревом вершины МК W  $\langle 100 \rangle$ , проводилась термополевая перестройка поверхности вершины МК. В отличие от обычно применяемой методики термополевой перестройки [8], которая ведется в сильном электрическом поле "автоионной полярности", перестройка поверхности МК проводилась в, так называемом, "прямом" электрическом поле [11]. В соответствии с этим методом, процесс перестройки проводился до момента образования четырехгранного тетраэдрического угла в направлении  $\langle 100 \rangle$ . Момент образования этого угла можно было определить как визуально, по эмиссионному изображению, так и по кривым кинетики полного тока эмиссии [11]. После завершения процесса перестройки вольтамперная характеристика (ВАХ) диода с термополевым катодом претерпевала изменения (рис. 6, кривая 2) по сравнению с исходной ВАХ диода (рис. 6, кривая 1), полученной в условиях, когда вершина эмиттера имела скругленно-сглаженную форму. Затем на перестроенную поверхность вершины МК W  $\langle 100 \rangle$  из калиброванной молекулярной пушки напылялись атомы Zr в количестве равном, примерно, одному монослою. Процесс напыления Zr контролировался с помощью масс-спектрометра МС-7303. Начало процесса напыления Zr фиксировалось по моменту появления в спектре остаточных газов массовых пиков изотопов Zr. Укажем, что напыление Zr проводилось в отсутствие электрического поля, при температуре поверхности МК, равной  $T \sim (1200-1300)$  К при парциальном давлении кислорода ( $10^{-4}-10^{-5}$ ) Па. В этих условиях структура перестроенной поверхности сохраняется неизменной в течение времени напыления, так как при данных температурах процесс самодиффузии протекает крайне медленно. После напыления Zr в атмосфере кислорода производился процесс формовки поверхности эмиттера. В процессе формовки атомы Zr, случайно распределенные на поверхности эмиттера, мигрируют по поверхности вершины МК вплоть до образования устойчивых молекулярных комплексов Zr — O — W на плотноупакованных гранях типа  $\{100\}$  W. Отметим, что процесс формовки конечной структуры эмиттирующей поверхности ZrO/W  $\langle 100 \rangle$  катода может проводиться различными технологическими методами. Один из таких методов описан в [2] и заключается в активации процесса поверхностной диффузии атомов Zr сильным импульсным электрическим полем эмиссионной (для электронов) полярности.

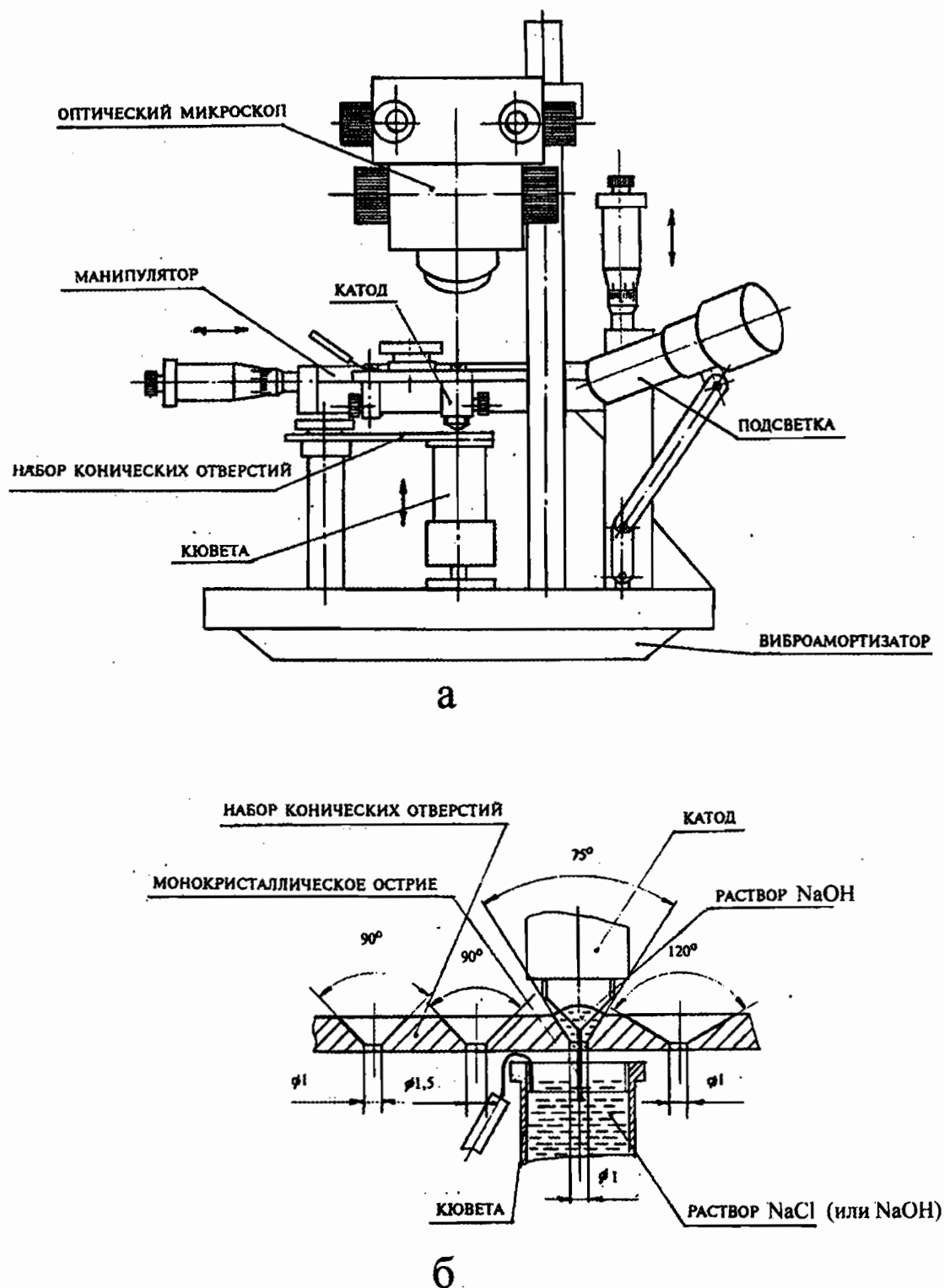


Рис. 5. Установка для прецизионного электрохимического травления катодов.

а — общий вид установки,

б — фрагмент установки (сечение пластины, в которой осуществлялось травление "в капле")



При таком воздействии атомы Zr под действием поляризационной силы ( $\bar{\Pi}$ )

$$\bar{\Pi} = \frac{1}{2} \alpha \cdot \text{grad}(F_s^2), \quad (3)$$

где  $\alpha$  — индуцированный приповерхностным электростатическим полем дипольный момент атома,  $\bar{F}_s$  — напряженность поля, в результате процесса поверхностной диффузии преимущественно мигрируют к локальным участкам поверхности эмиттера, вблизи которых существует максимальный градиент напряженности поля. Так как для полностью перестроенной поверхности в "прямом" [11] электрическом поле максимальное значение градиента напряженности поля образуется вблизи участков поверхности W с максимальной локальной кривизной, то, соответственно, атомы Zr будут преимущественно скапливаться на гранях типа {100} и на моноатомных ступенях (вициналях) граней типа {111}, образующих боковые грани тетраэдра. Следует заметить, что им-

пульсное воздействие сильным электрическим полем, наряду с активацией процесса миграции, позволяет также визуально контролировать процесс формовки поверхности, наблюдая за эволюцией эмиссионных изображений. Описанный процесс формовки поверхности ZrO/W <100> катода в импульсном электрическом поле занимает ~ 1-5 минут. Время формовки поверхности катода зависит от целого ряда параметров технологического процесса: температуры поверхности эмиттера, длительности и амплитуды импульса напряжения, периода повторения импульсов, уровня парциального давления кислорода в вакуумной камере и иных факторов. Критерием окончания процесса формирования поверхности катода является образование пяти ярких устойчивых эмиссионных рефлексов вдоль кристаллографических направлений <100> (рис. 1, б, в). ВАХ диода в результате описанной выше технологии процесса формирования поверхности катода показана на рис. 6 (кривая 3).

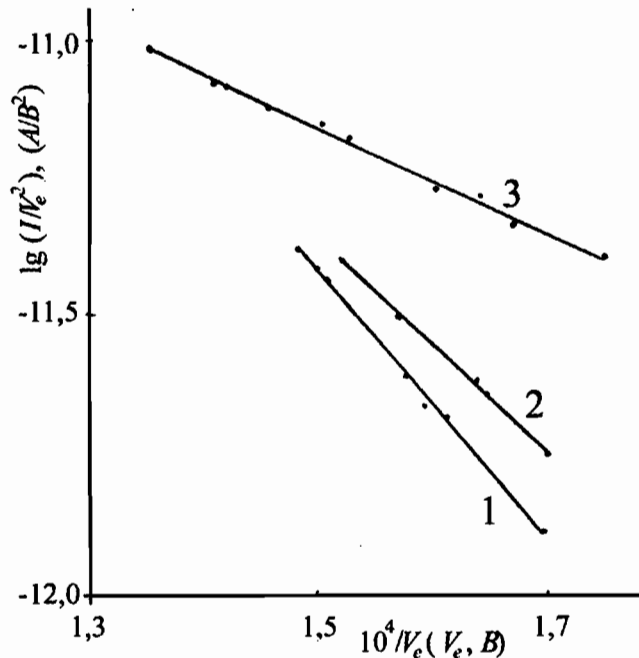


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) вакуумного диода с термополевым катодом на различных стадиях формирования эмиттирующей поверхности катода.

1 — исходная ВАХ (катод со скругленно-сглаженной высокотемпературным прогревом эмиттирующей поверхностью); 2 — ВАХ после термополевой перестройки поверхности катода в "прямом" электрическом поле; 3 — ВАХ диода с термополевым катодом с двойной локализацией эмиссии

Важно отметить, что кратко описанная выше технология формирования поверхности катода является оригинальной и позволяет существенно увеличить электронную яркость и угловую интенсивность эмиссии катода по сравнению с аналогичными эмиссионными параметрами так называемых Schottky катодов [4], которые в настоящее время выпускаются единственной фирмой — “Field Emission Corporation”, и широко используются в качестве источника электронов в растровых электронных микроскопах, серийно выпускаемых различными фирмами, и в Оже-микроанализаторах для химического анализа (JAMP-7803F, фирма “JEOL”).

Сравнение телесных углов, в которых локализуется эмиссия центрального пучка электронов, показывает, что, в зависимости от режима эмиссии, телесный угол  $\Omega$  для катода, сформированного по методу двойной локализации, уменьшается в 10 и более раз по сравнению с соответствующим телесным углом для Schottky катода, изготовленного традиционным методом избирательной адсорбции Zr в атмосфере кислорода [4].

Таким образом, применение метода двойной локализации позволяет, при прочих равных условиях, увеличить угловую интенсивность эмиссии катода более чем в 10 раз и, соответственно, в такое же число раз может быть повышена плотность мощности электронного пучка, сформированного ЭОС с таким катодом, на поверхности образца-мишени. Оценки электронной яркости катодов с двойной локализацией эмиссии показали, что  $B$  достигает значений  $\sim 10^{10}$  А/(см<sup>2</sup>ср).

Следует отметить также, что поверхность термополевого катода, изготовленного по методу двойной локализации, в отличие от Schottky катода [4], обладает весьма высокой устойчивостью по

отношению к процессу возбуждения взрывного пробоя и сохраняет стабильность эмиссионных свойств вплоть до температур, близких к температуре плавления ( $T_1$ ) вольфрама ( $T_1 = 3660$  К). Данная особенность катода, изготовленного по методу двойной локализации, обусловлена уникальными физико-химическими свойствами поверхности и приповерхностного слоя катода, которые создаются в результате термополевого и адсорбционного воздействия на исходную атомарно-чистую поверхность вершины микрокристалла W.

Обнаруженная устойчивость и стабильность поверхности катода с двойной локализацией эмиссии и, соответственно, высокая стабильность тока эмиссии определяется высокими энергиями связи (когезии) поверхностных молекулярных комплексов: Zr — O — W. Вывод о высокой энергии связи поверхностных молекулярных комплексов Zr — O — W основан на результатах прямых экспериментов [2], согласно которым энергия активации поверхностной диффузии поверхностных комплексов, образованных в результате описанной выше структурной и физико-химической модификации исходной скругленно-сглаженной поверхности W, оказалась весьма значительной и достигала значений  $\sim 6,0$ – $6,5$  эВ, что приблизительно в два раза выше среднего значения энергии активации поверхностной миграции собственных атомов W по поверхности МК W. Отметим, что близкие результаты, указывающие на большие энергии связи поверхностных атомов, были получены также в исследованиях по адсорбции и последующей поверхностной диффузии атомов Hf на поверхности МК W [8]. Характерные свойства и эмиссионные параметры катода Schottky и катода с двойной локализацией эмиссии сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Свойства и эмиссионные параметры различных катодов

Свойства и эмиссионные параметры	Шоттки (Schottky) катод	Катод с двойной локализацией эмиссии
Электронная яркость (А/см <sup>2</sup> ср)	до $\sim 10^8$	до $\sim 10^{10}$
Угловая интенсивность эмиссии (А/ср)	$\sim 10^{-3}$	$> 10^{-1}$
Рабочая температура в режиме эксплуатации (К)	$\sim (1500 - 1800)$	$\sim (1500 - 2300)$
Вакуумные условия в режиме эксплуатации (торр)	не хуже $10^{-8}$	не хуже $10^{-7}$
Полуширина энергетического распределения на полувысоте (эВ)	$\sim 0,5$	$\leq 1,0$

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована и разработана физическая технология формирования эмиттирующей поверхности термополевого катода с двойной локализацией эмиссии.

2. Разработана и создана технологическая комплексная установка, позволяющая формировать эмиттирующую поверхность термополевых катодов, обладающих высокой электронной яркостью (до  $\sim 10^{10}$  А/см<sup>2</sup> ср) и угловой интенсивностью эмиссии (до  $\sim 10^{-1}$  А/ср и выше).

3. Разработанные термополевые катоды с двойной локализацией эмиссии могут использоваться в электронной микроскопии, Оже-спектрометрии, в установках по электронной и рентгеновской литографии а также в ЭОС, предназначенных для формирования субмикронных электронных зондов с высокой плотностью мощности ( $P_b \gg 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>).

Работа поддержана грантом РФФИ № 98-02-18101.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучинин В.В. // Научное приборостроение. 1999. Т.9, №1. С. 3–18.
2. Птицын В.Э. Термополевые процессы, активированные воздействием сильных электрических полей и концентрированных потоков энергии на конденсированное вещество. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Петербург: ИАНП

- РАН, 1996. 345 с.
3. Veneklasen L.N. // Optik. 1972. V. 36, № 4. P. 410–433.
4. Swanson L.W., Schwind G.A. Handbook of Charged Particle Optics. By CRC Press LLC, N.Y., 1997. P. 77–102.
5. Гелевер В.Д. и др. // Известия АН. Сер. физическая. 1998. Т. 62, № 3. С. 615–621.
6. Ptitsin V.E. // Proc. 5 Int. Vacuum Microelectronics Conf. 1992. Vienna. Austria. P1–11.
7. Модинос А. Авто-, термо- и вторично-электронная эмиссионная спектроскопия. М.: Наука, 1990. 320с.
8. Шредник В.Н. Диффузия и рост кристаллов на металлической поверхности, изучаемые в атомном масштабе. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Ленинград: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1985. 565 с.
9. Swanson L.W. // J. Vacuum Science and Technology. 1975. V. 12, № 6. P. 1228–1233.
10. Swanson L.W., Crouser L.C. // J. Appl. Phys. 1969. V. 40, № 12. P. 4741–4749.
11. Птицын В.Э., Фурсей Г.Н. // Известия АН СССР. Сер. физическая. 1988. Т. 52, № 8. С. 1513–1517.

*Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 05.10.99.

## THERMAL FIELD CATHODE WITH DUAL EMISSION CONFINEMENT

V. E. Ptitsin, S. V. Maximov

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

The work is devoted to one of the key problems of forming high power density ( $> 10^8$  W/cm<sup>2</sup>) submicron electron probes, that of developing the physical process technology for making thermal field electron sources of high electron brightness and angular emission intensity. The current state and existing methods of improving the emission ability of thermal field cathodes are reviewed. An original physical technology for forming the emitting surface of thermal field emitters with unique emission parameters is introduced.