

УДК 621.362, 537.58, 537.533.3, 681.2

© В. Э. Птицын

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДА ТЕРМОЭМИССИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

В разделе 1 работы проведен анализ современного состояния исследований по проблеме термоэмиссионного преобразования тепловой энергии в электрическую энергию. Из приведенных в аналитическом обзоре данных следует, что "потенциал развития" метода термоэмиссионного преобразования энергии практически исчерпан, ибо достигнутые в настоящее время физико-технические характеристики действующих плазменных термоэмиссионных преобразователей энергии близки к теоретически возможным предельным значениям. Разделы 2 и 3 работы посвящены разработке физических основ нового метода преобразования тепловой энергии в электрическую энергию и моделированию прототипов вакуумных эмиссионных устройств преобразования энергии с источниками электронов — катодами с микро- или наноструктурированной эмиссионной поверхностью. В результате моделирования показано, что если в качестве катода устройства использовать катоды со структурированной эмиттирующей поверхностью, а процессы эмиссии и переноса электронов осуществлять под действием специальной суперпозиции электрического и магнитного полей (силы Лоренца), то такой подход позволит создавать устройства преобразования энергии, энергетическая эффективность которых может значительно (на порядки величины) превышать эффективность существующих плазменных термоэмиссионных преобразователей. Показано, что использование в эмиссионных устройствах преобразования энергии структурированных катодов на основе наноструктур (нанотрубок), функционирующих в условиях полевой (автоэлектронной) эмиссии электронов, позволяет осуществлять прямое преобразование тепловой энергии окружающей среды ($T \sim 300$ К) в электрическую энергию.

Кл. сл.: преобразование энергии, пространственный заряд, термоэлектронная эмиссия, шоттки-эмиссия, термополевая эмиссия

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1–4], одним из методов прямого преобразования тепловой энергии в электрическую энергию является метод термоэмиссионного преобразования энергии. Основное предназначение термоэмиссионных устройств преобразования энергии (ТС — Thermionic Converter) состоит в получении электрической энергии для использования в космосе, под водой, а также в различных удаленных районах. Отметим также, что по своему принципу действия ТС удачно сочетаются с атомным реактором. Масса и размеры такой малогабаритной атомной электростанции позволяют использовать ТС на космических аппаратах для питания бортовых приборов и электрических двигателей.

Известны различные режимы функционирования ТС [1–4], среди которых такие режимы, как вакуумный, квазивакуумный и диффузионный, в настоящее время достаточно хорошо изучены. Механизм процессов, протекающих в так называемом дуговом режиме, остается пока до конца не выясненным.

Основными техническими характеристиками ТС являются: плотность мощности генерируемого

тока (ω) и коэффициент полезного действия (η). Другими не менее важными эксплуатационными характеристиками ТС являются стабильность его параметров, а также продолжительность непрерывной работы ТС.

Наиболее существенным недостатком существующих плазменных ТС является долговременная нестабильность технических характеристик ТС, которая обусловлена изменениями во времени микрогеометрии малых межэлектродных зазоров вследствие термического испарения вещества электродов при высоких рабочих температурах. Кроме того, в процессе функционирования ТС может происходить короткое замыкание между электродами, которое, по-видимому, связано с ростом микрокристаллов (вискерсов) по эпитаксиальному механизму.

Цель настоящей работы заключается в разработке физических и корпускулярно-оптических принципов построения вакуумных эмиссионных устройств преобразования тепловой энергии в электрическую энергию нового типа (TFC), которые были бы лишены недостатков существующих плазменных ТС.

В этой связи в работе предлагается пересмотреть традиционный подход к построению ТС, ко-

торый, как известно, основан на идее компенсации поля пространственного заряда (SC) электронов эмиссии ионами плазмы. В работе исследуется возможность построения TFC^{*)}, в которых компенсация поля SC осуществляется за счет создания в области эмиссии и транспорта потока специального распределения потенциала самосогласованного электростатического поля. Напряженность поля может варьироваться как за счет структурирования эмиссионной поверхности, так и за счет введения в TFC специального полезадающего электрода — экстрактора. Для того чтобы исключить возможность попадания части эмиттированного потока на экстрактор TFC, предложено использовать известный способ магнитной изоляции потока заряженных частиц. Так как в предложенном подходе к построению TFC рассматриваются процессы эмиссии и переноса электронов в вакууме, в следующем разделе работы (раздел 1) изложены известные представления о процессах, протекающих в вакуумных ТС. При написании этого раздела были использованы материалы работ [1–4]. Остальные разделы работы являются оригинальными.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ТРАДИЦИОННОГО ТЕРМОЭМИССИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

1.1. Термоэлектронная эмиссия

Согласно [1–4], принцип действия всех типов термоэмиссионных преобразователей основан на использовании двух физических явлений — термоэлектронной эмиссии и контактной разности потенциалов. Контактная разность потенциалов возникает между поверхностями двух разнородных тел, электрически соединенных друг с другом. Если работы выхода этих тел равны соответственно Φ_1 и Φ_2 , то между их поверхностями существует разность потенциалов (V_c), называемая контактной и численно равная разности работ выхода:

$$V_c = \Phi_1 - \Phi_2, \quad (1)$$

где Φ_1 и Φ_2 — численные значения работ выхода в вольтах (В).

Термоэлектронная эмиссия характеризуется плотностью тока насыщения эмиссии (J_s), т. е. максимально возможной плотностью тока эмиссии при данной температуре эмиттирующей поверхно-

сти. Плотность тока насыщения определяется формулой Ричардсона—Дэшмана

$$J_s = (1-r)RT_e^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_e}{kT_e}\right), \quad (2)$$

где e — абсолютная величина заряда электрона; r — коэффициент отражения электронов от потенциального барьера на границе раздела (эмиттирующая поверхность катода—вакуум); $R = 4\pi me k^2 h^{-3}$ — универсальная термоэмиссионная постоянная, иногда называемая постоянной Зоммерфельда ($R = 120.4 \text{ А/}(\text{см}^2\text{К}^2)$); k — постоянная Больцмана; T_e — абсолютная температура катода; Φ_e — работа выхода катода — эмиттера электронов (В); m — масса электрона; h — постоянная Планка. Следует отметить, что формула (2) дает значение плотности эмиссионного тока насыщения для случая, когда внешнее электрическое поле у поверхности катода равно нулю. При наличии внешнего электрического поля (E) эмиссионный ток не имеет истинного насыщения и непрерывно увеличивается с возрастанием электрического поля. Этот эффект получил название эффекта Шоттки (V. Schottky). В этом случае плотность эмиссионного тока (Schottky Emission) определяется формулой

$$J_{\text{Schottky}} = J_s \cdot \exp\left(\frac{1}{kT_e} \cdot \sqrt{\frac{e^3 E_s}{4\pi\epsilon_0}}\right), \quad (3)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, E_s — напряженность электростатического поля на эмиттирующей поверхности катода.

Качественно зависимость тока (I), протекающего через вакуумный диод, от разности потенциалов между электродами диода $\Delta\phi$ показана на рис. 1. Здесь следует иметь в виду, что под $\Delta\phi$ понимается разность потенциалов между электродами диода, которая неким специальным образом может варьироваться в пределах от небольших отрицательных значений $\sim 10 V_c$ до положительных значений $\sim (10^2-10^3) V_c$. Важно отметить также, что если $\Phi_e > \Phi_c$, то при отсутствии внешнего источника напряжения в замкнутой цепи реального диода (катод—вакуум—коллектор—нагрузочное сопротивление R_n ($R_n \rightarrow 0$)—катод) будет протекать отличный от нуля электрический ток $I_0 \approx \chi (\Phi_e - \Phi_c)^{3/2}$, причем $I_s / I_0 \sim 10^2-10^3$.

1.2. Физика процессов преобразования тепловой энергии в электрическую энергию в вакуумном ТС

Простейший ТС представляет собой диод с плоскопараллельными электродами, межэлектрод-

^{*)} Здесь и в дальнейшем тексте вакуумные эмиссионные устройства нового типа, предназначенные для преобразования тепловой энергии в электрическую энергию, в отличие от плазменных ТС будем для краткости обозначать аббревиатурой TFC (Thermal Field Emission Energy Converter).

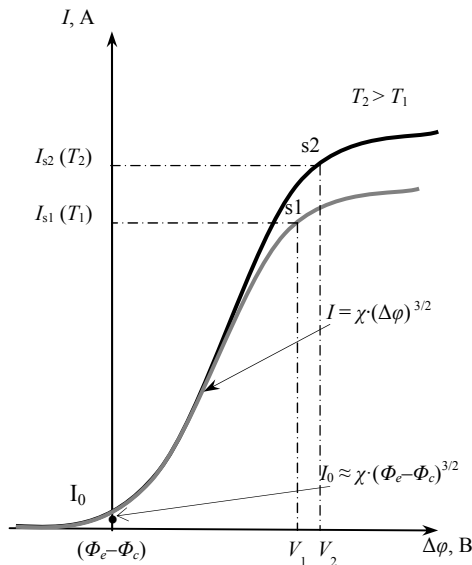


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики вакуумного диода для двух значений температур (T_1 , T_2) поверхности катода (χ — перванс диода)

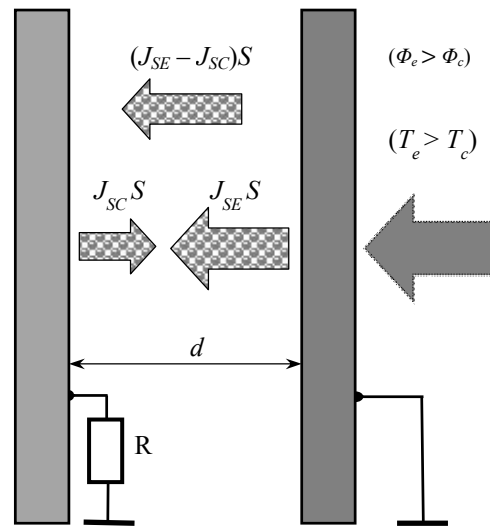


Рис. 2. Электрическая схема, иллюстрирующая механизм прямого преобразования тепловой энергии в электрическую энергию в вакуумном ТС (S — площадь одного из плоскопараллельных электродов диода)

ное пространство которого откачено до низкого давления 10^{-6} – 10^{-8} мм рт. ст. (рис. 2). Подобный преобразователь обычно называют вакуумным. При нагревании одного из электродов — эмиттера, с его поверхности эмиттируются электроны. Через межэлектродный промежуток электроны эмиссии поступают на второй электрод — коллектор, температура которого должна быть существенно ниже температуры эмиттера. В отличие от радиотехнического диода к коллектору диода-преобразователя не прикладывается напряжение от внешнего источника. Необходимое условие для создания направленного потока электронов заключается в том, чтобы работа выхода эмиттера Φ_e была больше работы выхода коллектора Φ_c . В этом случае между электродами будет существовать разность потенциалов V_c , равная разности их работ выхода. Для того чтобы плотность эмиссионного тока насыщения с поверхности эмиттера (J_{se}), определяемая уравнением (2), достигала значений, представляющих практический интерес, температура эмиттера должна быть достаточно высокой. Температура коллектора, наоборот, должна быть достаточно низкой, чтобы плотность эмиссионного тока насыщения с коллектора (J_{sc}) была значительно меньше J_{se} .

Если предположить, что электроны эмиссии беспрепятственно проходят через межэлектродный промежуток, то плотность тока преобразователя (J_c) будет равна

$$J_c = J_{se} - J_{sc}.$$

Электроны эмиссии уносят с электрода определенную энергию. Если $J_{sc} = 0$, то при плотности тока с эмиттера J_{se} с единицы его площади уносится энергия, равная

$$(J_{se}/e) \cdot (e\Phi_e + 2kT_e).$$

Первое слагаемое в скобках представляет собой потенциальную энергию электронов эмиссии относительно уровня Ферми эмиттера, а второе — среднюю кинетическую энергию электронов эмиссии при температуре катода-эмиттера T_e . Попадая на коллектор, электроны отдают ему свою кинетическую энергию $2kT_e$ и, опускаясь на уровень Ферми коллектора, уменьшают свою потенциальную энергию относительно уровня Ферми эмиттера до величины $e\Phi_c$. Если $\Phi_e > \Phi_c$, то электроны имеют еще избыток потенциальной энергии, равный $J_{se} \cdot (\Phi_e - \Phi_c)$. Прежде чем по внешней электрической цепи "вернуться" на эмиттер, электроны за счет этого избытка энергии мо-

гут совершить полезную работу. Отдавая коллектору часть своей энергии, электроны, естественно, нагревают его. Поэтому от коллектора необходимо постоянно отводить тепло.

Электроны эмиссии уносят с эмиттера значительное количество тепловой энергии, однако только часть ее может быть непосредственно превращена в электрическую. Часть энергии, равная $J_{SE}(\Phi_c + 2kT_e/e)$, идет на нагревание коллектора и для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую энергию уже потеряна. Кроме того, часть тепловой энергии, подводимой к эмиттеру, теряется излучением и также не участвует в непосредственном преобразовании энергии. К сожалению, в вакуумном ТС существует еще один источник потерь, свойственный этому типу преобразователя. Проблема состоит в том, что электроны эмиссии создают в межэлектродном промежутке отрицательный SC, который препятствует движению электронов эмиссии к коллектору вследствие отталкивания одноименных зарядов. Чем больше межэлектродное расстояние, тем больше ширина и высота потенциального барьера и тем меньше электронов преодолеют этот барьер и достигнут коллектора. При межэлектродном расстоянии порядка 0.1 мм или больше эмиссионный ток, достигающий коллектора, составляет ничтожно малую долю от тока насыщения эмиттера. Уменьшение межэлектродного расстояния до 0.01 мм или меньше приводит к значительному

уменьшению влияния SC электронов. По этой причине создание лабораторных моделей вакуумных ТС с такими малыми межэлектродными расстояниями связано с большими техническими трудностями, а создание промышленных преобразователей с высокими значениями полезной электрической мощности не представляет практического интереса.

Более того, даже при значительном уменьшении влияния поля SC (вследствие уменьшения межэлектродного расстояния) длительная работа вакуумного ТС с достаточно высокими плотностями тока оказывается невозможной из-за испарения материала эмиттера [3].

Таким образом, из вышеизложенного следует, что феномен контактной разности потенциалов совместно с явлением термоэлектронной эмиссии позволяет осуществлять прямое ("безмашинное") преобразование тепловой энергии непосредственно в электрическую энергию.

1.3. Об эффективности процесса преобразования энергии в "идеальном" вакуумном ТС

Для оценки максимальной энергетической эффективности метода ТС рассмотрим некоторые электрические характеристики "идеального" диода — преобразователя тепловой энергии непосредственно в электрическую энергию или ТС. Для простоты, будем полагать, что электроды диода плоскопараллельны (рис. 2). Идеальным будем считать диод, в котором отсутствуют джоулевы потери энергии в электродах и токовводах, эмиттер является изотермическим, а температура коллектора настолько низка, что эмиссионный ток с его поверхности отсутствует. Кроме того, в таком диоде не учитываются ограничения эмиссионного потока за счет поля SC электронов эмиссии.

Подобный идеальный диод, конечно, условное понятие, и электрические характеристики такого диода практически не достигаются. Однако их рассмотрение представляет определенный интерес, поскольку они позволяют оценить предельные характеристики реальных ТС. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) идеального диода (ТС) представлена на рис. 3 [3].

На этом же рисунке показаны распределения потенциальной энергии электронов по межэлектродному промежутку, соответствующие различным участкам ВАХ. Участок а–b характеризует область тока насыщения. Для любой точки этого участка плотность тока диода равна плотности тока насыщения J_{SE} . Полезное напряжение диода увеличивается при перемещении к точке b, в которой оно достигает значения V_c , равного контакт-

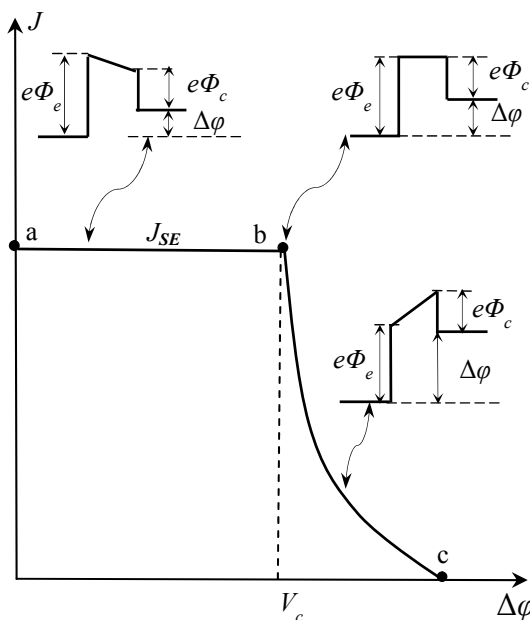


Рис. 3. ВАХ идеального диода (ТС) и диаграммы потенциальной энергии электрона для различных участков ВАХ [3]

ной разности потенциалов, т. е. $V_c = \Phi_e - \Phi_c$. В соответствии с этим плотность полезной мощности диода линейно увеличивается от нуля в точке а до значения $\omega_c = J_{SE} \cdot V_c$ в точке б, в которой потенциалы эмиттера и коллектора равны. При дальнейшем увеличении сопротивления нагрузки, приводящем к возрастанию полезного напряжения, потенциал коллектора становится меньше потенциала эмиттера (потенциал и потенциальная энергия электрона имеют противоположные знаки). Плотность тока диода J на участке б-с уже не зависит от работы выхода эмиттера и определяется высотой потенциального барьера ($\Phi_c + \Delta\phi$):

$$J = (1-r)RT_e^2 \cdot \exp\left(\frac{-e\Phi_c - e\Delta\phi}{kT_e}\right) < J_{SE}. \quad (4)$$

Поэтому участок б-с на ВАХ называется областью задерживающего потенциала. Плотность электрической мощности диода в этой области равна $\omega = J \cdot \Delta\phi < \omega_c$.

Коэффициент полезного действия диода (η) равен отношению полезной электрической мощности к полной подводимой к эмиттеру тепловой мощности. В установившемся режиме эта тепловая мощность равна потерям тепловой мощности эмиттером. Для рассматриваемого идеального диода потери энергии эмиттером определяются двумя процессами — эмиссией электронов и излучением. Тепловая энергия, уносимая электронами эмиссии с единицы поверхности эмиттера в единицу времени, равна

$$q_e = J \left[\Phi_e + (2kT_e) \frac{1}{e} \right]. \quad (5)$$

Как известно, максимально возможные при температуре T_e потери энергии излучением у абсолютно черного тела равны σT_e^4 с единицы поверхности в единицу времени, где σ — постоянная Стефана—Больцмана. Отличие реальной поверхности от поверхности абсолютно черного тела характеризуется степенью черноты ε , значения которой лежат в диапазоне $0 < \varepsilon < 1$. Вообще говоря, ε зависит от температуры поверхности. Для системы, состоящей из двух противостоящих друг другу поверхностей различных тел, перенос энергии излучением с одной поверхности на другую помимо температур последних определяется эффективной степенью черноты ε_s . В рассматриваемом случае подобную систему составляют эмиттер и коллектор. В этой системе потери энергии излучением с эмиттера с единицы площади за 1 с равны

$$q_e = \varepsilon_s \cdot \sigma (T_e^4 - T_c^4). \quad (6)$$

Таким образом, для идеального диода

$$\eta = \frac{J \Delta\phi}{J \left[\Phi_e + (2kT_e) \frac{1}{e} \right] + \varepsilon_s \sigma (T_e^4 - T_c^4)}. \quad (7)$$

Из выражения (7) и рис. 3 следует, что для идеального диода ТС максимальные значения $\eta_{\max}$ и $\omega_{\max} = J_{SE} \cdot (\Phi_e - \Phi_c)$ достигаются в точке б на ВАХ:

$$\eta_{\max} = \frac{J_{SE} V_c}{J_{SE} \left[\Phi_e + (2kT_e) \frac{1}{e} \right] + \varepsilon_s \sigma (T_e^4 - T_c^4)}, \quad (8)$$

где T_e , T_c — соответственно температуры эмиттера и коллектора; ε_s — эффективная степень черноты. Для плоских электродов ТС

$$\varepsilon_s = \left[\frac{1}{\varepsilon_e} - \frac{1}{\varepsilon_c} + 1 \right]^{-1},$$

где ε_e , ε_c — степени черноты эмиттера и коллектора соответственно. Для цилиндрических электродов ТС

$$\varepsilon_s = \left[\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{r_e}{r_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \right]^{-1},$$

где r_e , r_c — радиусы эмиттера и коллектора соответственно.

Для области задерживающего потенциала (участок б-с, рис. 3) зависимость плотности тока от напряжения $\Delta\phi$ определяется формулой (4) и, следовательно, как η , так и ω будут монотонно уменьшаться до нулевых значений в точке с.

Выражения для $\eta_{\max}$ и $\omega_{\max}$ позволяют оценить меру влияния поля SC электронов эмиссии на эффективность преобразования энергии в вакуумном ТС.

Для проведения оценок будем использовать следующие характерные значения физических величин: $\Phi_e = 3$ В, $\Phi_c = 2$ В, $T_e = 2000$ К, $T_c = 800$ К, $r = 0.5$, $\varepsilon_s \sim 0.5$ [3]. Тогда из формул (2–8) следует, что $J_{SE} \approx 6.5$ А/см², $\omega_{\max} \approx 6.5$ Вт/см² и $\eta_{\max} \approx 9$ %.

Исходя из приведенных выше оценок значений для J_{SE} , $\omega_{\max}$ и $\eta_{\max}$, определим теперь величину межэлектродного зазора (d) для вакуумного диода с плоскопараллельными электродами, в котором плотность потока электронов в зазоре равна плотности тока насыщения и составляет 6.5 А/см². Используя известное соотношение для так называемого закона "степени 3/2" [5] и полагая, что напряжение между электродами диода равно контактной разности потенциалов ($\Delta\phi = V_c \approx 1$ В),

получим $d \approx 6$ мкм. Отметим, что для цилиндрического диода вакуумный зазор столь же мал.

С точки зрения практической реализации устройств энергетической конверсии, приведенное выше численное значение для вакуумного зазора d является слишком малым. По этой причине создание эффективных систем для прямого преобразования энергии на основе "идеального" вакуумного диода с термоэмиссионным катодом технически и технологически затруднительно, экономически невыгодно и поэтому нецелесообразно [3]. В связи с этим вакуумные ТС вследствие сложной технологии изготовления малых межэлектродных зазоров, при которых возможны были бы удовлетворительные эксплуатационные показатели преобразователей, в настоящее время не применяются.

Рассмотрим теперь менее детально вопрос о возможности достижения характеристик идеального вакуумного ТС, которая не основана на идее компенсации поля SC за счет сближения электродов диода ТС.

Для нейтрализации отрицательного SC в межэлектродный зазор современных ТС вводят положительные ионы [1–4]. Один из способов введения положительных ионов — использование явления поверхностной ионизации. Второй способ заключается в использовании явления объемной ионизации газа в межэлектродном промежутке ТС. Для получения оптимальных величин работы выхода эмиттера (2.5–2.8 эВ) и коллектора (1.0–1.7 эВ) и для компенсации SC электронов, образующегося вблизи электродов, в зазор между ними обычно вводят легко ионизируемые пары Cs. Положительные ионы Cs образуются при столкновении атомов Cs с быстрыми и тепловыми электронами как на горячем катоде (поверхностная ионизация), так и в межэлектродном объеме (вследствие либо однократного соударения атомов Cs с быстрыми и тепловыми электронами, либо ступенчатой ионизации, при которой в результате 1-го соударения с электроном атом Cs переходит в возбужденное состояние, а при последующих — ионизуется). В последнем случае ТС работает в так называемом дуговом режиме. При используемых в современных ТС температурах электродов (1700–2000 К на катоде и 800–1100 К на коллекторе) их удельная мощность (в расчете на 1 см² поверхности катода) достигает ~ 10 Вт, а $\eta \sim 20\%$. Эти значения близки к теоретически возможным предельным значениям соответствующих параметров $\omega_{\max}$ и $\eta_{\max}$.

Следует отметить, что падение напряжения на нагрузочном сопротивлении плазменных ТС составляет $\Delta\varphi \sim (0.5–1)$ В, т. е. имеет значения, численно близкие к контактной разности потенциалов, но меньше V_c на величину падения напряжения на межэлектродном зазоре и потерь напряжения на коммутационных проводах.

По роду источника тепла различают ядерные (реакторные и радиоизотопные), солнечные и газопламенные ТС. В ядерных ТС используется тепло, выделяющееся в результате реакции ядерного деления (в реакторных ТС) или распада радиоактивного изотопа (в радиоизотопных). В солнечных ТС нагрев эмиттера осуществляется за счет тепловой энергии солнечного излучения (с применением гелиоконцентраторов). Газопламенные ТС работают на тепле, выделяющемся при сжигании органического топлива.

Первый в мире термоэмиссионный преобразователь-реактор "Топаз" [6, 7] с электрической мощностью около 10 кВт был создан в 1970 г. К середине 70-х гг. удалось достичь ресурса непрерывной работы одиночного ТС свыше 40 000 ч. В лабораторных испытаниях с вольфрамовым эмиттером и ниобиевым коллектором ($\eta \sim 17\%$, удельная электрическая мощность $\omega \sim 8$ Вт/см²) была достигнута стабильная работа ТС в течение 46 000 ч.

В настоящее время в США, Франции, России и в ряде других стран продолжают интенсивные работы по созданию плазменных ТС, пригодных для массового промышленного использования. В частности, проводятся исследования по использованию ТС в качестве высокотемпературного звена многоступенчатых преобразователей энергии, например, в сочетании с термоэлектрическими преобразователями, работающими при более низких температурах.

Однако, как следует из многочисленных данных современных исследований, посвященных теоретическому анализу и перспективам развития метода ТС [8–14], максимальные значения эффективности плазменных ТС невозможно существенно увеличить по сравнению с уже достигнутыми $\eta \approx 15\%$, $\omega \approx 10$ Вт/см², ибо указанные параметры близки к теоретически возможным предельным значениям (8).

Другими словами это означает, что в настоящее время потенциальные возможности для сколько-нибудь значительного повышения эффективности плазменных ТС по сравнению с уже достигнутыми физико-техническими и эксплуатационными характеристиками и параметрами, оказалась в значительной мере исчерпанными [8–14].

2. РАЗВИТИЕ МЕТОДА ТЕРМОЭМИССИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ

Как следует из предыдущего раздела, способ компенсации поля SC за счет введения в межэлектродный зазор устройств ТС положительных

ионов имеет ограниченные возможности для дальнейшего повышения энергетической эффективности метода ТС.

В целях развития метода ТС рассмотрим другой физический способ уменьшения влияния фактора поля SC электронов эмиссии на эффективность прямого преобразования энергии в эмиссионных устройствах.

В качестве исходной модели эмиссионного устройства будем рассматривать плоский вакуумный диод (рис. 2). Будем полагать, что потенциал поверхности катода равен нулю, а потенциал поверхности коллектора численно равен контактной разности потенциалов $V_c \approx 1$ В. Согласно [5, 15], выражение для плотности полного тока, протекающего в замкнутой цепи устройства, имеет вид

$$J = \frac{4\epsilon_0}{9} \cdot \left(\frac{2e}{m}\right)^{1/2} \cdot \frac{(\Delta\varphi)^{3/2}}{d^2} \equiv C \cdot \frac{(\Delta\varphi)^{3/2}}{d^2}, \quad (9)$$

где C — размерная постоянная, численно равная $2.33 \cdot 10^{-6}$ [СИ]. Полагая $J = 10$ А/см², $\Delta\varphi = V_c \approx 1$ В, получим $d \approx 5$ мкм, и, следовательно, в условиях термоэмиссии тока насыщения заданной плотности (2) напряженность (лапласова) поля на эмиттирующей поверхности будет равна $E_s \approx -2 \cdot 10^3$ В/см. Из полученной оценки и принципа суперпозиции полей также следует, что в условиях термоэмиссии тока насыщения напряженность поля SC (E_{sc}) должна быть весьма значительной — $E_{sc} \approx 2 \cdot 10^3$ В/см. Кроме того, важно отметить, что проделанная оценка для E_{sc} определяет максимальное значение напряженности поля SC, которое может быть создано током заданной плотности и разности потенциалов $\Delta\varphi = V_c \approx 1$ В. Если теперь увеличивать $\Delta\varphi$ ($\Delta\varphi > V_c$), то ток эмиссии будет медленно расти за счет эффекта Шоттки (см. рис. 1 и уравнение (3)).

Рассмотрим теперь следующую физическую ситуацию. Поместим на катод того же плоского диода (рис. 2) нормально к поверхности катода цилиндрическую микроструктуру (вискер, или нанотрубку, высотой h и радиусом ρ), ограниченную на вершине полусферой. Тогда для тех же условий ($\Delta\varphi = V_c \approx 1$ В) напряженность (лапласова) поля на вершине структуры (E_h) будет равна [21]

$$E_h = E_s \cdot \gamma \approx E_s \cdot (h/\rho) = (V_c/d) \cdot (h/\rho), \quad (10)$$

где γ — коэффициент усиления электрического поля (Field-enhancement Factor). Отметим, что соотношение (10) удовлетворительно согласуется с расчетами [21] при $h/\rho \gg 1$. Из (10) следует, что (для тех же значений $d = 5$ мкм и $\Delta\varphi = V_c$) при вариации (h/ρ) от 10^1 до $\sim 5 \cdot 10^3$ напряженность поля на вершине структуры E_h будет изменяться в пределах от $\approx 2 \cdot 10^4$ до $\approx 10^7$ В/см. Формально это оз-

начает, что при вариации параметра h/ρ и фиксированной разности потенциалов ($\Delta\varphi = V_c = \text{const}$) на поверхности вершины соответствующей структуры могут возбуждаться различные эмиссионные процессы: термоэмиссия тока насыщения, шоттки-эмиссия, расширенная шоттки-эмиссия, аномальная термополевая эмиссия и, наконец (для одностенных углеродных нанотрубок, $\rho \approx 0.5$ нм), может возбуждаться полевая эмиссия электронов. Другое следствие заключается в том, что уровень напряженности $E_h \geq 2 \cdot 10^3$ В/см, достаточный для компенсации (минимизации) фактора влияния поля SC на процесс эмиссии электронов с поверхности вершины структуры, может достигаться также (в зависимости от величины параметра h/ρ) и для диодов с "большими" межэлектродными зазорами ($5 \leq d \leq 25 \cdot 10^3$ мкм).

Приведенные выше численные оценки можно дополнить несколькими комментариями.

1. Если на первоначально "гладкой", бесструктурной поверхности катода плоского вакуумного диода создать (вырастить) известными технологическими средствами ансамбль вискеров (нанотрубок) с поверхностной плотностью n , тогда плотность мощности тока эмиссии с такой структурированной поверхности будет приближенно равна

$$\omega \cong V_c \cdot n \cdot J_{SE_i} \cdot \delta_i, \quad (11)$$

где J_{SE_i} — плотность тока эмиссии с поверхности i -го элемента ансамбля, $\delta_i = 2\pi\rho_i^2$ — площадь эмиттирующей поверхности i -го элемента. Полагая $J_{SE_i} = 10$ А/см² = const, получим $\omega \sim 10$ Вт/см² либо при $\rho_i = 0.1$ мкм и $n \sim 10^9$ см⁻², либо при $\rho_i = 1$ мкм и $n \sim 10^7$ см⁻². Современные ростовые технологии позволяют создавать ансамбли микро- и наноструктур с априорно заданной геометрией и плотностью упаковки структур [22–24]. Таким образом, перспективная задача разработки и создания действующих устройств TFC со структурированной эмиссионной поверхностью катода представляется достаточно физически обоснованной. Учитывая современный уровень развития нанотехнологий, эта задача, по-видимому, может быть успешно решена уже в течение ближайших нескольких лет.

2. Геометрия вакуумного устройства преобразования энергии со структурированной эмиссионной поверхностью катода может быть также сферической, цилиндрической или же более сложной.

3. Предложенный подход к построению TFC не накладывает каких-либо ограничений на физический механизм эмиссии электронов со структурированной поверхности катода устройства. Другими словами, это означает, что если в TFC-устрой-

стве есть возможность создавать на вершинах микроструктур сильные электрические поля, то по мере роста локальных значений напряженности поля F_s на поверхности катодов TFC могут возбуждаться различные эмиссионные процессы [16–20]:

- а) термоэмиссия тока насыщения (плотность тока J до $\sim 10^2$ А/см²);
- б) режим шоттки-эмиссии и режим расширенной шоттки-эмиссии (J до $\sim 10^5$ А/см²);
- в) режим аномальной термополевой эмиссии с поверхности наногетероструктур или же режим термополевой эмиссии (J до $\sim 10^7$ А/см²).

Так как в диодной структуре электродов TFC-устройства разность потенциалов между катодом и коллектором, "по определению" весьма мала и приближенно равна контактной разности потенциалов V_c ($V_c \sim 1$ В), то для создания сильного поля на структурированной эмиттирующей поверхности катода в диодную конфигурацию электродов устройства TFC может быть введен специальный дополнительный электрод-экстрактор. В зависимости от потенциала экстрактора (V_e), а также от геометрии и кривизны микро- или наноструктур на макроповерхности катода могут возбуждаться различные эмиссионные процессы: от термоэмиссии до полевой эмиссии. Для осуществления переноса эмиттированного потока от поверхности эмиттера к поверхности коллектора устройства может быть использован метод магнитной изоляции потока. Магнитная изоляция потока позволяет исключить попадание электронов на экстрагирующий электрод и тем самым сводит к нулю возможные неэффективные потери энергии при

переносе потока на поверхность коллектора с потенциалом V_c .

Принимая во внимание вышеизложенное, описанный метод преобразования энергии предлагается назвать методом *термополевого эмиссионного преобразования энергии*, а соответствующее устройство именовать — *термополевой эмиссионный преобразователь энергии* (TFC — Thermal-Field Emission Energy Converter). Функциональная схема вакуумного TFC приведена на рис. 4.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОТИПОВ ТЕРМОПОЛЕВЫХ ЭМИССИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ (TFC)

Исходя из сформулированных в предыдущем разделе физических и корпускулярно-оптических принципов, было проведено физическое и численное моделирование прототипов различных TFC-систем. Для моделирования процессов эмиссии и переноса потока электронов в самосогласованном статическом электромагнитном поле в вакуумных электронно-оптических системах TFC с различной конфигурацией полезадающих электродов использовались специальные программные пакеты [25–28]. Предварительные результаты моделирования для нескольких прототипов TFC опубликованы в работах [29, 30].

Результаты моделирования прототипов различных TFC показаны в Приложении на рис. П1–П5. В подписях к этим рисункам приведены конкретные численные значения для исходных физических и геометрических параметров, а также результаты расчетов соответствующих TFC-устройств. Совокупность приведенных численных данных позволяет воспроизводить и тестировать результаты проделанных расчетов, а также может быть использована в качестве первого приближения для проектирования матрицы структурированной поверхности катодов и создания на этой основе действующих лабораторных макетов TFC.

Следует отметить, что из результатов моделирования, приведенных на рис. П5, следует весьма важный вывод, который состоит в том, что задача создания автономных TFC, способных осуществлять прямое преобразование тепловой энергии окружающей среды ($T \sim 300$ К) в электрическую энергию, имеет решение и может быть реализована современными методами нанотехнологии [22–24].

Косвенное экспериментальное подтверждение корректности этого вывода, как представляется, содержится в одном из результатов работы [31], в которой с помощью высоковакуумного сканирующего туннельного микроскопа LSSPM (фирма "OMICRON", Germany) проводились исследования полевых эмиссионных свойств самоорганизованных наногетероструктур. Объектами исследования

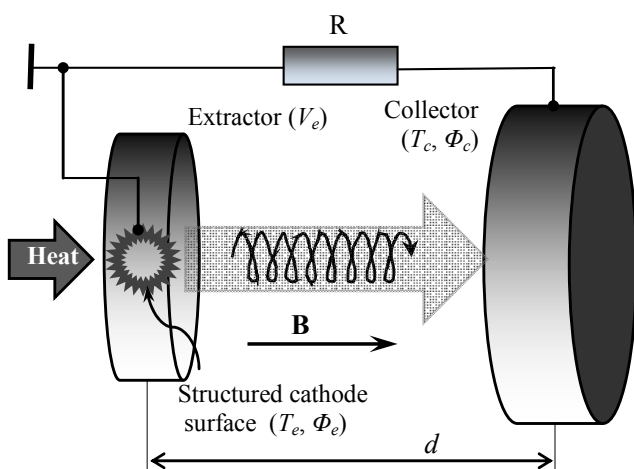


Рис. 4. Обобщенная схема TFC, иллюстрирующая феноменологию процессов эмиссии и переноса электронов в TFC с катодом со структурированной эмиссионной поверхностью

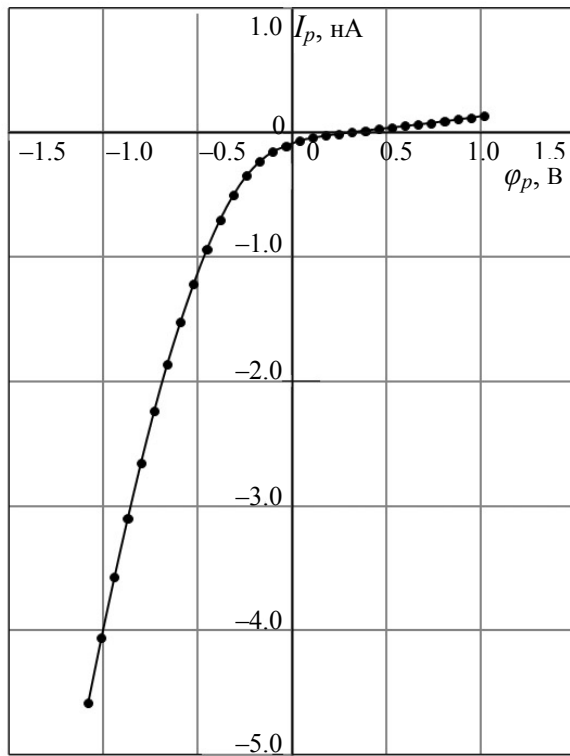


Рис. 5. ВАХ туннельного контакта (зонд—фрагмент поверхности, покрытой GaAs(111)-вискерами) [31]

являлись самоупорядоченные нитевидные кристаллы — выращенные на ориентированной подложке GaAs(111)-вискеры. В качестве зонда SPM в этих экспериментах использовался вольфрамовый зонд с радиусом закругления на вершине ~ 10 мкм. Зонд с таким "большим" радиусом позволял проводить интегральные измерения полевых эмиссионных свойств отдельных групп вискеро́в, локализованных в области туннельного контакта. Отметим, что конструкция LSSPM такова, что образец всегда находится под потенциалом земли. По этой причине ВАХ, полученные при положительном напряжении смещения, определяются полевой эмиссией из исследуемого образца. Измерения проводились в вакууме при давлении $P \sim 10^{-8}$ Па, при комнатной температуре поверхности образца и зонда. Плотность вискеро́в составляла $\sim 10^9$ см $^{-2}$, характерный линейный размер вершины $d \sim 30$ нм, а их высота ~ 4 мкм. Характерная ВАХ туннельного контакта (зонд—фрагмент поверхности, покрытой GaAs(111)-вискерами) приведена на рис. 5. Как видно из этого рисунка, при нулевом смещении ($\phi_p = 0$ В) в замкнутой измерительной цепи, включающей туннельный контакт, протекает отличный от нуля ток ~ 0.1 нА. Этот ток, очевидно, определяется разностью эмис-

сионных потоков с поверхности зонда и поверхности группы вискеро́в. Несложные расчеты и оценки показывают, что регистрируемый ток через туннельный контакт обусловлен в основном механизмом аномальной термополевой эмиссией электронов [17–19], активированной электрическим полем, создаваемым на поверхности W-зонда контактной разностью потенциалов системы электродов W—GaAs(111). Этот вывод хорошо согласуется также и с наблюдаемой "степенной" зависимостью тока с поверхности зонда I_p от разности потенциалов ϕ_p между электродами. Как отмечено в [17–19], слабая степенная зависимость (с показателем $n \sim 1.5$ –2) тока эмиссии от разности потенциалов между эмиттером и экстрактором характерна для явления аномальной термополевой эмиссии. Зависимость $I_p = I_p(\phi_p)$ на ВАХ (рис. 5) можно аппроксимировать так:

$$I_p \propto \phi_p^2.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ современного состояния исследований по проблеме термоэмиссионного преобразования тепловой энергии в электрическую энергию. На основании данных анализа сделано заключение о том, что "потенциал развития" традиционного "плазменного" метода термоэмиссионного преобразования энергии, основанного на идее компенсации ионами плазмы негативного влияния фактора поля SC электронов на процессы эмиссии и переноса потока, в значительной мере исчерпан.

2. В целях повышения энергетической эффективности метода эмиссионного преобразования энергии предложено создавать TFC, в которых "компенсация" негативного влияния фактора поля SC осуществляется либо за счет микро- и наноструктурирования эмиссионной поверхности катода, либо посредством создания в областях эмиссии и транспорта потока электронов в TFC специальной суперпозиции электрического и магнитного полей.

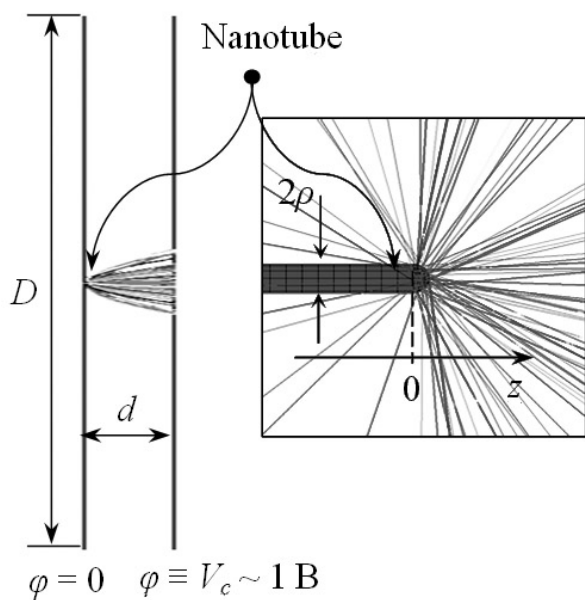
3. В результате физического и численного моделирования различных прототипов вакуумных TFC установлено, что если в качестве катода TFC использовать катоды со структурированной эмиттирующей поверхностью, а процессы эмиссии и переноса электронов осуществлять под действием специальной суперпозиции электрического и магнитного полей (силы Лоренца), то при таком подходе энергетическая эффективность TFC может значительно (на порядки величины) превышать эффективность существующих плазменных ТС. Кроме того, предложенный подход позволяет проектировать TFC с большими (несколько мм и более) вакуумными зазорами (d) между источ-

ником электронов и коллектором TFC (Приложение, рис. П2–П4).

4. Показано, что использование в TFC катодов на основе наноструктур (нанотрубок), функционирующих в условиях полевой (автоэлектронной)

эмиссии электронов, позволяет осуществлять прямое преобразование тепловой энергии окружающей среды ($T \sim 300$ K) в электрическую энергию (рис. П5).

ПРИЛОЖЕНИЕ



а

б

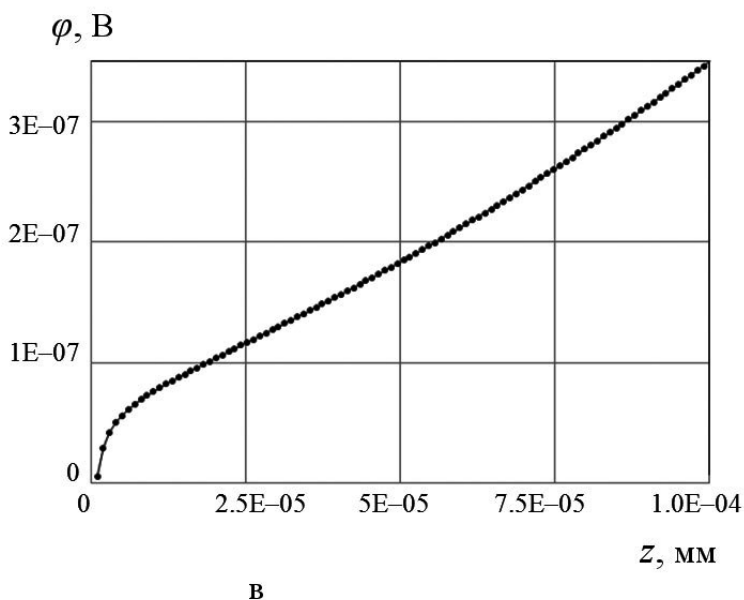


Рис. П1. Прототип вакуумного TFC с термоэмиссионным источником электронов — нанотрубкой.

а — сечение плоского конденсатора, образованного двумя электродами в форме дисков; в центре левого диска по нормали к поверхности диска помещена нанотрубка-эмиттер; $D = 10$ мм, $d = 0.5$ мм, $\rho = 1$ нм, $h/\rho = 100$, $\Phi_e = 3$ эВ, $J_{SE} = 38.96$ А/см² ($T_e = 2200$ K) и $J_{SE} = 6.61$ А/см² ($T_e = 2000$ K); б — верхняя часть нанотрубки-эмиттера и "веер" из траекторий электронов; в — распределение потенциала самосогласованного электрического поля вблизи вершины нанотрубки

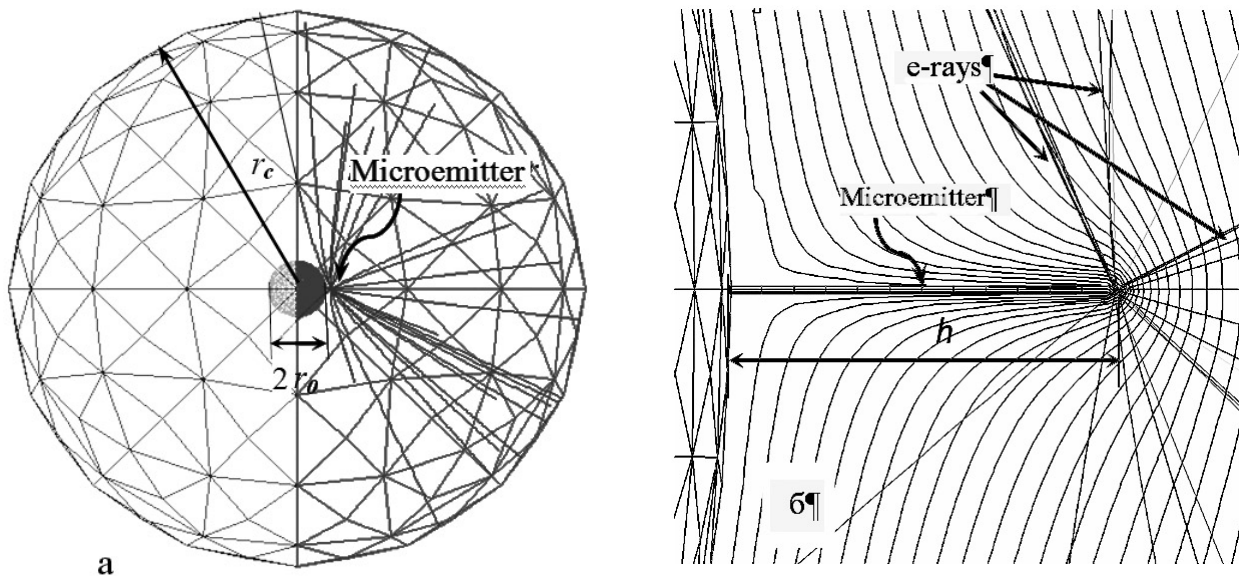


Рис. П2. Прототип вакуумного TFC с термоэмиссионным источником электронов — одиночным микроэммитером (вискером).

а — сечение сферического диода ($r_0 = 0.5$ мм, $r_e = 5$ мм, $T_e = 2000$ К, $\Phi_e = 3$ эВ, $r = 0.5$, $\rho = 1$ мкм, $h/\rho = 100$, $V_c = 1$ В, $J_{SE} = 6.62$ А/см²); б — фрагмент поверхности внутренней сферы с одиночным вискером; здесь же показаны контуры эквипотенциалов самосогласованного электрического поля и траектории электронов у поверхности вершины микроэммитера

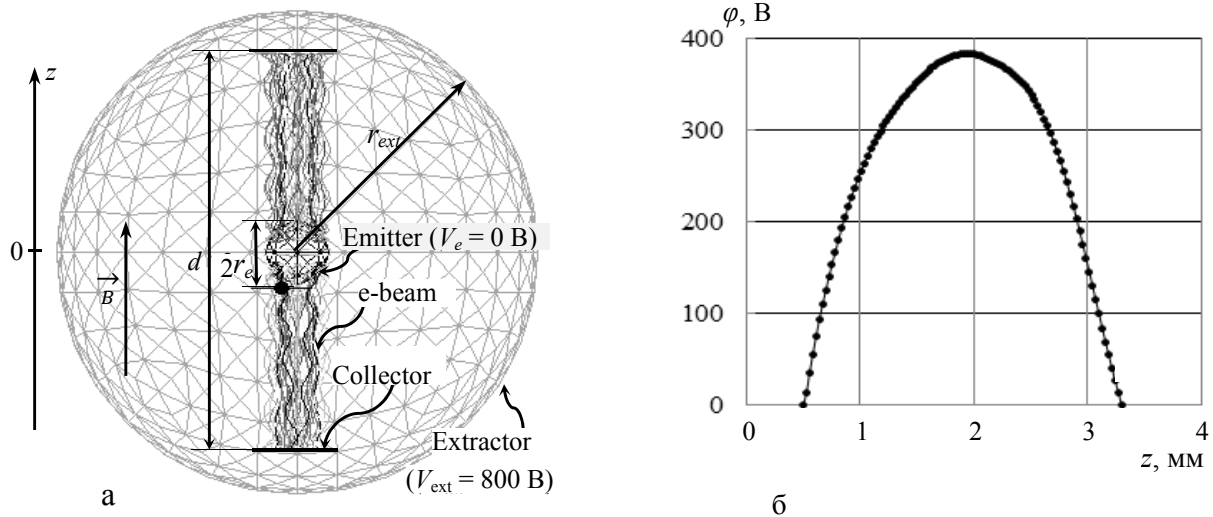


Рис. П3. Прототип вакуумного TFC с термоэмиссионным источником электронов на основе сферического вакуумного диода с двумя коллекторами в форме дисков.

а — геометрия TFC ($d = 6.6$ мм, $2r_e = 1$ мм, $B = 0.45$ Тл, $\Phi_e = 3$ эВ, $V_c = 1$ В, ток эмиссии с поверхности сферы равен 215 мА, плотность тока эмиссии 6.85 А/см² ($T_e = 2000$ К)) и траектории движения электронов под действием силы Лоренца; б — распределение потенциала самосогласованного электрического поля вдоль оси z

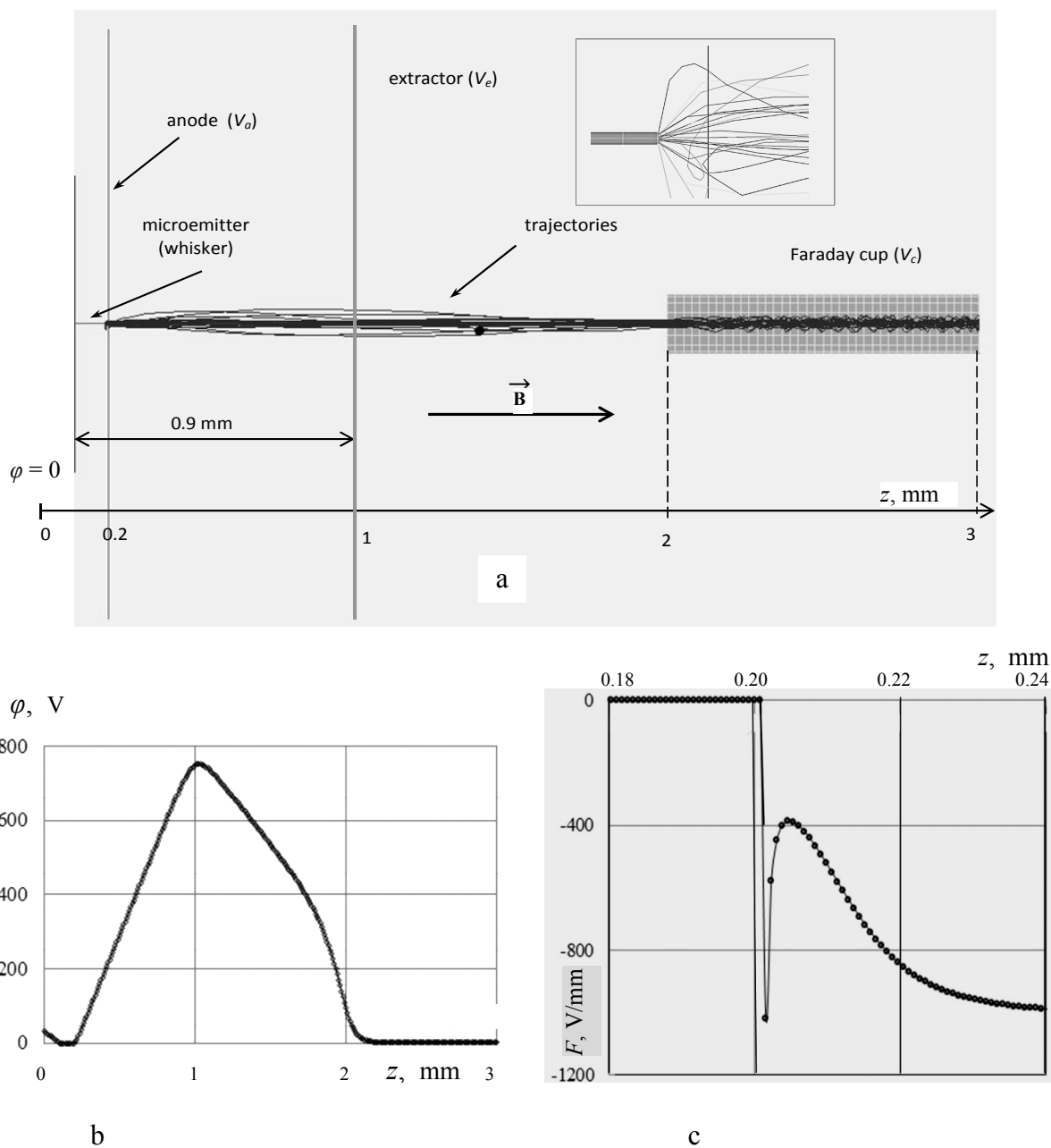


Рис. П4. Прототип вакуумного TFC с источником электронов — микроэммитером (вискером), функционирующим в режиме расширенной шоттки-эмиссии (Extended Schottky Emission). а — сечение TFC плоскостью, проходящей через ось аксиальной ЭОС конвертера (радиус полусферической вершины вискера $\rho = 1 \mu\text{m}$, $h/\rho = 5$; анод и экстрактор имеют форму дисков с отверстиями 1.0, 0.015 и 1.0, 0.1 mm соответственно; $\Phi_e = 3 \text{ eV}$, $V_e = 800 \text{ V}$, $V_c = 1 \text{ V}$; $B_z = 0.25 \text{ T}$, $B_x = B_y = 0$; ток шоттки-эмиссии $1.14 \mu\text{A}$; средняя яркость катода — $5.665 \text{ A}/(\text{sr}\cdot\text{cm}^2)$; максимальная плотность тока шоттки-эмиссии $J_{SE} = 16.7 \text{ A}/\text{cm}^2$); на вставке показаны: модель вискера, траектории движения электронов под действием силы Лоренца и фрагмент электрода (анода); б, с — кривые распределения потенциала и напряженности самосогласованного электрического поля вдоль оси z соответственно

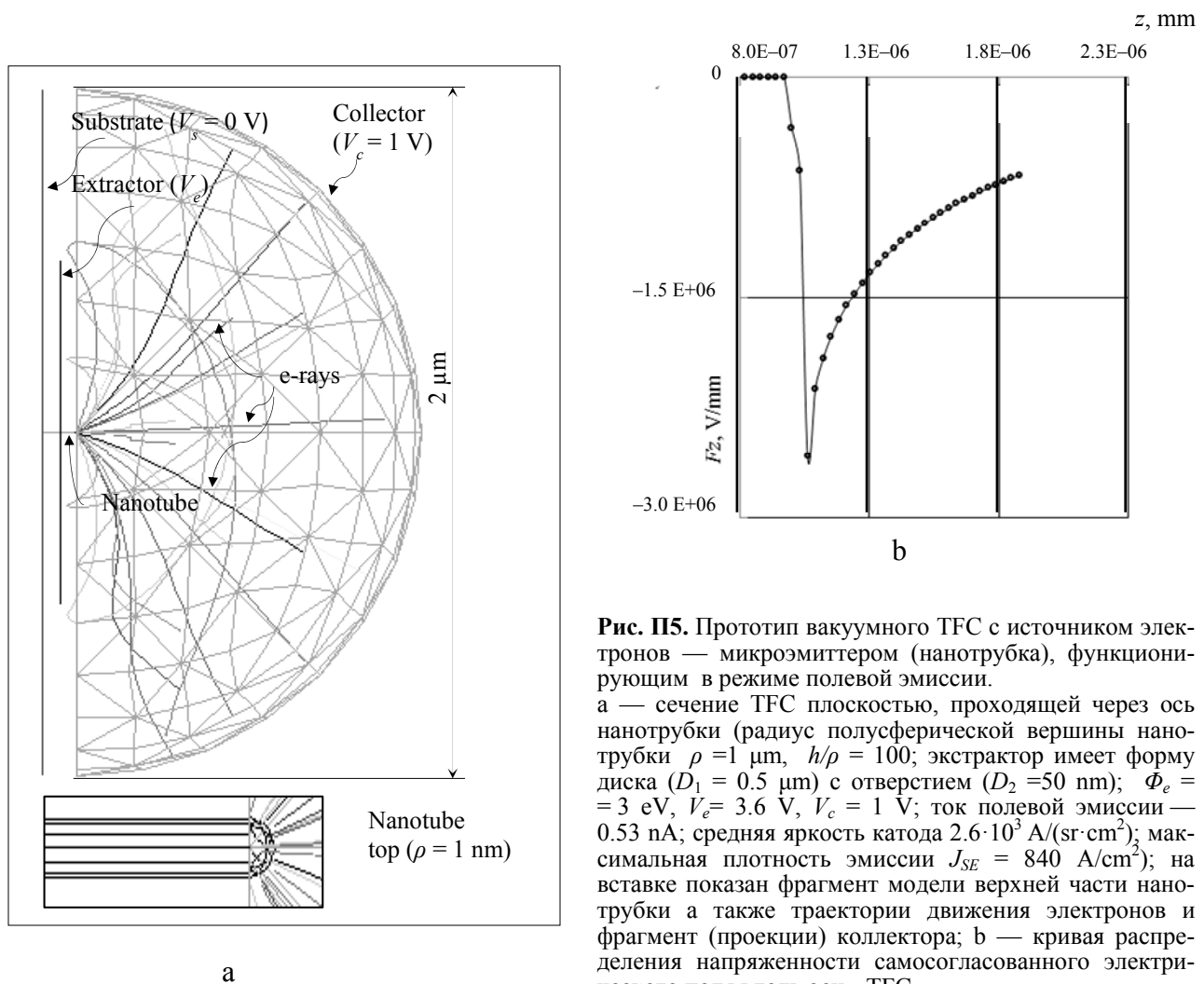


Рис. П5. Прототип вакуумного TFC с источником электронов — микроэмиттером (нанотрубка), функционирующим в режиме полевой эмиссии.

а — сечение TFC плоскостью, проходящей через ось нанотрубки (радиус полусферической вершины нанотрубки $\rho = 1 \mu\text{m}$, $h/\rho = 100$; экстрактор имеет форму диска ($D_1 = 0.5 \mu\text{m}$) с отверстием ($D_2 = 50 \text{ nm}$); $\Phi_e = 3 \text{ eV}$, $V_e = 3.6 \text{ V}$, $V_c = 1 \text{ V}$; ток полевой эмиссии — 0.53 nA ; средняя яркость катода $2.6 \cdot 10^3 \text{ A/(sr}\cdot\text{cm}^2)$; максимальная плотность эмиссии $J_{SE} = 840 \text{ A/cm}^2$); на вставке показан фрагмент модели верхней части нанотрубки а также траектории движения электронов и фрагмент (проекция) коллектора; б — кривая распределения напряженности самосогласованного электрического поля вдоль оси z TFC

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стаханов И.П., Черковец В.Е. Физика термоэмиссионного преобразователя. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
2. Ярыгин В.И. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии. Ч.1. Введение в специальность. Учебное пособие. Обнинск: ИАТЭ, 2006. 104 с.
3. Ушаков Б.А., Никитин В.Д., Емельянов И.Я. Основы термоэмиссионного преобразования энергии. М.: Атомиздат, 1974. 289 с.
4. Hatsopoulos G.N., Gyftopoulos E.P. Thermionic energy conversion. Cambridge: MIT Press (Vol. 1: Processes and Devices. 1973. 278 p.; Vol. 2: Theory, technology, and application. 1979. 683 p.).
5. Humphries S.Jr. Charged particle beams. N.Y.: Wiley and Sons, 2002. 847 p.
6. Кузнецов В.А., Грязнов Г.М., Артюхов Г.Я. и др. Разработка и создание термоэмиссионной ядерно-энергетической установки "Топаз" // Атомная энергия. 1974. Т. 36, вып. 6. С. 450–457.
7. Богуш И.П., Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е. и др. Космическая термоэмиссионная ЯЭУ по программе "Топаз". Принципы конструкции и режимы работы II // Атомная энергия. 1991. Т. 70, вып. 4. С. 162–170.
8. Лазаренко Д.Г. Математическая модель для расчета тепло-, электрофизических характеристик цилиндрического электрогенерирующего канала II // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2007. № 3, вып. 2. С. 89–100.
9. Виноградов Е.Г., Линник В.А., Лазаренко Д.Г. и др. Методика расчета вольт-амперных характеристик термоэмиссионных ЭГК сложной геометрии // Атомная энергия. 2009. Т. 106, вып. 5. С. 257–262.
10. Кумаев В.Я., Лазаренко Д.Г. Численное моделирование тепловых и электрических процессов в тер-

- вах. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. Препринт ФЭИ-3170. 2009. 20 с.
11. *Ионкин В.И., Ярыгин В.И.* Роль ядерной энергетики в космических исследованиях. Опыт и достижения СССР/России. Современное состояние и перспективы развития: учебное пособие. Обнинск: ИАТЭ, 2007. 80 с.
 12. *Виноградов Е.Г., Ярыгин В.И.* Методика расчета электротеплофизических характеристик термоэмиссионного электрогенерирующего канала. Учебное пособие. Обнинск: ИАТЭ, 2008. 40 с.
 13. *Бабушкин Ю.В., Зимин В.П., Хомяков Е.А.* Программное обеспечение и результаты моделирования термоэмиссионных систем II // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 3. С. 53–57.
 14. *Лазаренко Г.Э., Лазаренко Д.Г., Ярыгин В.И.* Термоэмиссионный преобразователь. Заявка на изобретение № 2009114500 от 16.04.2009.
 15. *Грановский В.Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток / Ред. Л.А. Сена, В.Е. Голант. М.: Наука, 1971. 543 с.
 16. *Modinos A.* Field, thermionic and secondary electron emission spectroscopy. N.Y.: Plenum Press, 1984. 320 p.
 17. *Птицын В.Э.* Аномальная термополевая эмиссия // ЖТФ. 2007. Т. 77. С. 113–118.
 18. *Птицын В.Э.* Термополевая эмиссия с поверхности низкоразмерных наногетероструктур // Научное приборостроение. 2008. Т. 18, № 3. С. 21–31.
 19. *Ptitsin V.E.* Phenomenological model of an abnormal thermal field electron emission from the 2D nanoheterostructured surfaces // Journal of Physics Conf. Ser. 2011. V. 291. P. 12–19.
 20. *Ptitsin V.E.* Non-stationary thermal field emission // Advances in Imaging and Electron Physics. Academic Press. 2000. V. 113. P. 327–393.
 21. *Forbes R.G., Edgcombe C.J., Valdre U.* Some comments on models for field enhancement // Ultramicroscopy. 2003. V. 95. P. 57–65.
 22. *Цырлин Г.Э.* Эффекты самоорганизации наноструктур на поверхности полупроводников при молекулярно-пучковой эпитаксии. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб.: ИАП РАН, 2001. 135 с.
 23. *Dubrovskii V.G., Cirlin G.E., Ustinov V.M.* Semiconductor nanowhiskers: synthesis, properties, and applications // Semiconductors. 2009. Т. 43, № 12. С. 1539–1584.
 24. *Елецкий А.В.* Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. 2002. Т. 172, № 4. С. 401–438.
 25. *Птицын В.Э., Трезубов В.Ф.* О возможности формирования субмикронных электронных пучков с плотностью мощности до 100 МВт/см² // Научное приборостроение. 2002. Т. 12, № 3. С. 15–25.
 26. *Ptitsin V.E., Tregubov V.F.* A high power density sub-micron electron beam source // Ultramicroscopy. 2003. V. 95. P. 131–138.
 27. *Ptitsin V., Tregubov V., Jinbiao Z.* Application software package Tau for simulation point-emitters // IVNC and IFES. Technical Digest. (9 International Vacuum Nanoelectronics Conference and 50 International Field Emission Symposium. China, Guilin. 2006). 2006. P. 215–216.
 28. Charge particle optics programs. URL: (<http://www.electronoptics.com/>).
 29. *Ptitsin V.E.* New thermal field electron emission energy conversion method // Second International Conference: Nanomaterials: Application and Properties. Ukraine, Alushta, 2012. NAP'2012 Proceedings. V. 1, N 4. P. 4.
 30. *Ptitsin V.E.* Research and development of the thermionic energy conversion method // 26th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC), Chicago, USA, 2013. Proc. IVNC. 2013. P. 341–345.
 31. *Ptitsin V.E., Cirlin G.E., Samsonenko Yu.B., Masalov S.A. et al.* Field electron emission from GaAs nanowhiskers fabricated by MBE, IVNC and IFES 2006 // 9th International Vacuum Nanoelectronics Conference and 50th International Field Emission Symposium, China, Guilin, 2006. Technical Digest. P. 133–134.

**Институт аналитического приборостроения РАН,
г. Санкт-Петербург**

Контакты: *Птицын Валерий Эдуардович,*
vptitsin@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 29.07.2013

THE CURRENT STATE AND PROSPECTS OF THE THERMIONIC ENERGY CONVERSION METHOD DEVELOPMENT

V. E. Ptitsin

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg

In the first part of the work analyses the current state of research on thermionic energy conversion method. Analytical review of the data showed that the "capacity of a development" of the method has been exhausted,

since the present physical and technical characteristics of existing plasma thermionic energy converters are close to the theoretically possible limits.

The second part of the work is devoted to development of the foundations of the new thermal energy into electrical energy conversion method and the prototypes modeling of the vacuum energy conversion devices with electron emissive sources — cathodes with micro- or nanostructured emission surfaces.

The simulation shows that, if the device use the cathodes with micro- or nanostructured surface and emission and electron transfer processes to implement under the action of special superposition electric and magnetic fields (Lorentz force), then this approach would create conversion devices, energy efficiency which can significantly (by orders of magnitude) than the effectiveness of existing plasma thermionic energy converters.

It is shown that the use in the vacuum conversion devices nanotube-based field emission cathodes, enables direct conversion of heat energy environment ($T \sim 300$ K) into electrical energy.

Keywords: energy conversion, space charge, thermionic emission, Schottky emission, field emission