

УДК 621.455: 621.387.1

А.С. ДОЛГОВ, А.И. ОРАНСКИЙ, Д.А. ОРАНСКАЯ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»***АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МЕТАЛЛОПОРИСТЫХ КАТОДОВ С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ
МАТРИЦЫ ТИПА «СЭНДВИЧ»**

Разработана диффузионная математическая модель металлопористых катодов (МПК) с использованием объемной плотности атомов активатора на эмитирующей поверхности, позволяющая анализировать влияние макроструктуры губки и других параметров катодов на их эмиссионную способность, с учетом долговременных изменений распределения активатора в основном материале эмиттера. Показано, что применение гетерогенных структур матрицы типа «сэндвич» могут обеспечить повышение эффективности МПК, однако для этого потребуются согласование всего набора параметров катодов. Предложены перспективные направления развития данной модели и продолжения анализа.

Ключевые слова: металлопористые катоды, сэндвич, электронная эмиссия.

**1. Суть научной проблемы и ее связь
с перспективными практическими
задачами**

Благодаря высокой эмиссионной способности и долговечности металлопористые катоды (МПК) [1, 2] в настоящее время являются одними из наиболее востребованных термоэлектронных эмиттеров. Они широко применяются как в электровакуумных приборах (ЭВП) [3], так и в газоразрядных полых высокоэмиссионных катодах (ГПВК) [4, 5].

До последнего времени МПК эксплуатировались в ЭВП с плотностью тока термоэмиссии несколько ампер с квадратного сантиметра с максимальной долговечностью несколько тысяч часов.

Сейчас МПК рассматривается в качестве основного элемента многих перспективных ЭВП. К ним относятся, в первую очередь, лампы бегущей волны (ЛБВ) СВЧ диапазона, перспективные ЭВП миллиметрового диапазона, вакуумные интегральные схемы и др. [3]. Для их работы необходимы электронные пучки с плотностью десятки A/cm^2 .

МПК в составе ГПВК уже применяются и фигурируют в проектах новых мощных маршевых электроракетных двигателей, ускорителях заряженных частиц для термоядерных реакторов, устройствах плазменной пайки и сварки, дуговой резки и литья металлов и т.д. [4, 5].

Создание МПК, способных обеспечить токи $\sim 10-100 A/cm^2$ в течении десятков тысяч часов безотказной работы является актуальной научно-технической проблемой.

**2. Анализ публикаций.
Постановка задачи**

Анализ публикаций по МПК, начиная с 60-х годов XX века (появление первых образцов) [1, 2] и до настоящего времени [3] показал, что принципиальный состав катодов этого типа остался практически неизменным.

Металлопористый катод представляет собой пористую губку (матрицу) из тугоплавких металлов (вольфрам, рений, молибден и их сплавы), заполненную эмиссионно-активным веществом (барийсодержащие химические соединения).

Во всех типах МПК основным элементом является пористая губка. Ее свойства в значительной степени ответственны за эмиссионные параметры катода. От величины открытой пористости губки зависит запас активного вещества в катоде и скорость испарения активатора (в первую очередь Ва), влияющие на долговечность и надежность работы прибора. Размеры пор и их распределение по поверхности губки определяют уровень эмиссии катода и эмиссионную однородность поверхности. Материал губки влияет на интенсивность протекания химических реакций в катоде и количество образующегося активатора.

Большинство современных публикаций посвящено теоретическим и экспериментальным исследованиям. МПК направлены, прежде всего, на увеличение их эмиссионной способности и долговечности [3]. Эти проблемы являются наиболее актуальными для разработчиков МПК. Область поисков по совершенствованию МПК должна включать управ-

ление пористостью и неоднородностью эмиссии на основе более детального исследования явлений, происходящих на поверхности и в теле пористой губки катодов.

Современные экспериментальные методы исследования рабочих процессов в МПК в настоящее время являются весьма дорогостоящими и длительными. Одними из наиболее эффективных и экономичных методов анализа этих явлений в катодах являются аналитические исследования на основе их математических моделей. Поэтому главной **целью данной работы** является создание математической модели МПК, которая позволяет изучать влияние макроструктуры матрицы (губки) на эффективность катодов этого типа. А одной из основных задач является оценка целесообразности проектирования МПК с гетерогенной структурой матрицы типа «сэндвич».

3. Решение задачи

3.1. Основные допущения и ограничения модели

Пропитанный активатором эмиссии элемент рассматривается как плоская система, где толщина существенно уступает другим размерам. Описание процессов в такой структуре принято одномерным, причем граничные поверхности функционально различны: одна предназначена для эмитирования, другая лишена такой функции и играет лишь роль габаритного ограничения.

Смысл заполнения материала активатором (пропитки) – в обеспечении длительного покрытия эмиссионной поверхности, что позволяет снизить эффективную работу выхода электронов, то есть повышает ее эмиссионную способность (ток эмиссии при соответствующей температуре). Уход атомов активатора с поверхности в результате испарения предопределяет поступление этого материала на поверхность из примыкающих слоев материала эмиттера. Это обстоятельство задает направленный перенос активатора в блоке эмиттера и асимметрию распределения плотности по объему.

Механизм (кинетика) перемещения материала активатора – это самостоятельная область анализа, которая может включать как гидродинамические (макроскопические) категории, так и представления кинетики атомов. Особенности названных процессов могут существенно варьироваться в зависимости от характера пористости (характерные размеры пор, их концентрация) и от соотношения атомных параметров основного материала и активатора (атомные радиусы, энергии связи, вид взаимодействия). В силу случайности размещения микрополостей в ос-

новном материале и ожидаемой хаотичности перемещений атомов активатора в качестве относительно универсальной схемы принято представление о пропорциональности потока активатора градиенту его концентрации.

Тем самым вводится общая картина миграции в материале эмиттера, близкая к механизмам теплопроводности, атомной диффузии, фильтрации и др. Диффузионная схема формирует относительно простое и качественно надежное описание свойств эмиттера, представляющих прикладной интерес. При этом ввиду того, что теоретическое прогнозирование диффузионных параметров затруднительно, целесообразно использование соответствующих эмпирических данных.

Известно [1, 2], что эффективная работа выхода существенно изменяется в зависимости от степени покрытия поверхности катода активатором.

При описании объемных процессов в ограниченной среде возникает вопрос – является ли поверхность отдельным структурным объектом или только границей объема? В применении к миграционным процессам первая из названных концепций предпочтительна, если диффузионная компонента поступает извне (из примыкающего газового объема), а проникновение в матрицу практически ограничено первым слоем. Свойства поверхностных распределений в этих условиях изучались ранее [6-9]. При поступлении атомов на эмиссионную поверхность из глубин катодного материала концептуальное обособление поверхности может связываться с существенным (резким) отличием взаимодействия атомов активатора с атомами поверхностного слоя от аналогичного взаимодействия в толще основного материала. В известных металлопористых катодах (МПК) подобные различия не выявляются [6, 7]. В силу этого далее принимается трактовка диффузионных процессов как объемных с соответствующими условиями на границе объема. При этом вместо поверхностной плотности атомов активатора, как наиболее часто используемой характеристики [6-9], нами применяется их объемная плотность у поверхности.

3.2. Уравнения модели

Перенос активатора в среде (в пределах эмиттера) описывается диффузионным уравнением

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad n = n(x, t); \quad (1)$$

где n – объемная концентрация атомов активатора, D – коэффициент диффузии, имеющий размер-

ность m^2/c .

Уравнение охватывает неограниченные сроки ($t > 0$) и область пространства $-b < x < 0$, причем b – толщина слоя. Полагаем, что координате $x = -b$ соответствует тыльная поверхность слоя, а значению $x = 0$ рабочая, т.е. эмитирующая поверхность. Начальное распределение задает «внешняя» функция $\rho(x)$, форма которой ограничивается только намерениями и технологическими возможностями разработчиков МПК.

Механизму массообмена на рабочей поверхности соответствует совпадение диффузионного потока из толщ материала на поверхность и потока испарения с поверхности. Первый задается градиентом концентрации, а второй концентрацией на поверхности. Таким образом

$$-D \frac{\partial n}{\partial x}(0) = \alpha a n(0), \quad (2)$$

где α – вероятность испарения атома активатора за единицу времени,

a – толщина приповерхностного слоя, обеспечивающего испарение.

Величина « a » едва ли существенно превышает межатомное удаление в материале эмиттера.

Физические условия и, следовательно, их формальное представление могут варьироваться. В качестве первого шага сделаем предположение, что значение b достаточно велико (это может быть обусловлено стремлением обеспечить требуемый значительный запас активатора, т.е. достаточно продолжительную безотказную работу устройства – ресурс), так что обращаемся к обсуждению диффузионных процессов в полубесконечной среде.

Условие (2) устанавливает однозначное соответствие между значением функции у поверхности и ее производной. Можно умозрительно распространить это соответствие и на пространственную зону вне реального материала $x > 0$ (линейная экстраполяция). При этом экстраполированная зависимость $n = n(x)$ пересечет нулевое значение на некотором удалении от физической границы λ

$$\lambda = \frac{D}{\alpha a}. \quad (3)$$

Таким образом, нулевое граничное условие на условной («экстраполированной») границе приблизительно обеспечивает условие (2) в некоторой окрестности физической границы, значительно упрощая при этом аналитические построения.

Если начальное распределение имеет вид сосредоточенного всплеска (δ – функция) в точке, удаленной от поверхности на величину « c », то без учета поверхностных ограничений (бесконечная среда) уравнение (1) даёт

$$\frac{Q}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{(x+c)^2}{4Dt}}, \quad (4)$$

где Q – общее количество частиц.

В силу линейности уравнения (1) ему удовлетворяет и любая сумма функций, продуцируемых сосредоточенным введением в любую позицию. Если полагать, что в начальный момент наряду с введением частиц в точку « $-c$ » также вводится материал отрицательной плотности того же масштаба в точку $c+2\lambda$, то два слагаемых общего результата обеспечат обращение величины $n(\lambda, t)$ в нуль во все моменты времени. Таким образом, возникает распределение для бесконечной среды, обеспечивающее нулевое граничное условие на экстраполированной границе. Тем самым реализуется точное решение для интересующей полубесконечной среды. Принимая во внимание (4), получаем

$$n(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{4\pi Dt}} \times \left[e^{-\frac{(x+c)^2}{4Dt}} - e^{-\frac{(x-2\lambda-c)^2}{4Dt}} \right]. \quad (5)$$

Выражение (5) играет роль функции Грина для диффузионной задачи с начальным распределением общего вида. Имеем

$$n(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \times \int_{-\infty}^0 \rho(x') \left[e^{-\frac{(x+x')^2}{4Dt}} - e^{-\frac{(x-2\lambda-x')^2}{4Dt}} \right] dx'. \quad (6)$$

Функция (6) есть общее решение задачи миграции в полубесконечной среде при произвольном начальном распределении и наличии ухода частиц с поверхности. В некоторых случаях формула (6) может быть дополнительно упрощена. Если $\rho(x) = \text{const}$, то интегрирование (6) приводится к интегралам вероятностей.

3.3. Эволюция режимов

Начальный этап эксплуатации эмиттера МПК

связан с обеднением активатора в зоне, примыкающей к рабочей поверхности. Глубокие слои матрицы при этом практически не затрагиваются, т.е. исходный уровень концентрации активатора остается неизменным. Однако область частичного опустошения постепенно продвигается вглубь образца и для варианта умеренной толщины (реальные объекты таковы) достигнет тыльной поверхности. Распределение плотности активатора приобретёт вид монотонно убывающей зависимости (предполагается отсутствие потерь на тыльной поверхности). Уровень потока атомов активатора при этом будет постепенно выравниваться, в противном случае возникают накопление активатора на каких-то участках, неправдоподобное для однородной линейной структуры.

Разумеется, в силу ограниченности запаса активатора истинно стационарное распределение при непрерывном испарении с поверхности возникнуть не может, но, тем не менее, в последующем развитии процессов качественных изменений не ожидается: будут происходить только относительно медленные количественные сдвиги. Таким образом, долговременный режим эксплуатации эмиттера огрублено может рассматриваться как двухстадийный. В линейной аппроксимации характер распределения плотности атомов активатора, соответствующей двум указанным стадиям имеет вид, представленный на рис. 1.

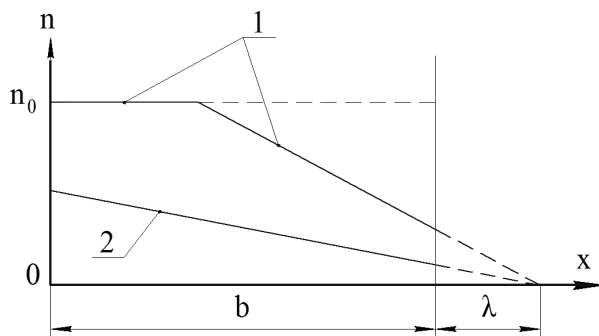


Рис. 1. Характер распределения плотности атомов активатора в теле матрицы: 1 – начальная стадия эксплуатации; 2 – режим длительной работы МПК

Общее количество активатора Q в катодe следует балансовому требованию

$$\frac{dQ}{dt} = -I, \quad (7)$$

где I – общий поток испарения с поверхности.

При этом

$$I = jS, \quad j = \alpha an, \quad Q(0) \equiv Q_0 = n_0 bS, \quad (8)$$

где S – площадь излучающей поверхности,

n – концентрация активатора у поверхности (аргумент опущен),

n_0 – исходная концентрация (уровень пропитки).

Выражения для Q , соответствующие оговоренным этапам, различаются. Как видно из приведенного рис. 1

$$Q_1 = Q_0 - \frac{1}{2} \frac{(n_0 - n)^2}{n} \lambda S, \quad (9)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{(b + \lambda)^2}{\lambda} - \lambda \right] n S. \quad (10)$$

Выражение (9, 10) совпадают, когда значение n снижается до уровня

$$n_m = \frac{\lambda}{b + \lambda} n_0. \quad (11)$$

Таким образом, некоторому моменту t_m определяемому значением

$$n_m \equiv n(t_m)$$

соответствует переход от режима первой стадии долговременной эволюции к другому, формально не имеющему временных ограничений.

Обращаясь к соответствию (7), с учетом набора выражений (8-11), получаем уравнения для функций $n_1(t)$, $n_2(t)$, отвечающих указанным этапам

$$\frac{dn_1}{dt} = -2 \frac{\alpha a}{\lambda} \frac{n_1^3}{n_0^2 - n_1^2}, \quad (12)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = -\frac{2D}{b^2 + 2b\lambda} n_2, \quad (13)$$

имеем

$$n_2(t) = \frac{1}{b + \lambda} n_0 e^{-\frac{2D}{b^2 + 2b\lambda} (t - t_m)}, \quad (14)$$

$$t > t_m,$$

$$\frac{n_0^2}{2} \left[-\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_0^2} \right] + \ln \frac{n_0}{n_1} = -2 \frac{\alpha a}{\lambda} t, \quad (15)$$

$$0 < t < t_m.$$

Для не слишком малых значений t роль первого слагаемого слева от знака равенства (15) преобладает. Сохраняя только эту составляющую, записываем

$$n_1(t) \approx \frac{n_0}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha a}{\lambda} t}} \quad (16)$$

Вводя вместо n_1 значения n_m (11) находим также величину t_m , служащую оценкой срока перехода от одной стадии к другой

$$t_m \approx \frac{b^2 + 2 b \lambda}{4 D} \quad (17)$$

Первая стадия функционирования устройства характеризуется относительно медленным снижением поверхностной концентрации (степени покрытия) по корневому закону (16). Сроки порядка t_m (17) соответствуют вовлечению в механизм испарения всего объема эмиттера, так что дальнейшие изменения n происходят в отсутствие нетронутых запасов активатора и потому соответствуют более отчетливому экспоненциальному понижению согласно (14).

Т.к. начальная концентрация активатора n_0 должна быть не ниже эмпирически подобранного уровня n_p , обеспечивавшего оптимальный режим, то целесообразна такая организация процесса, когда режим вида (16) обеспечит длительное поддержание уровня n в окрестности n_p . Медленное изменение n согласно (16) достигается при низких значениях α и повышенных уровнях D . Физически это соответствует слабому испарению при достаточно высокой объемной подвижности диффундирующей компоненты. Впрочем, как уход с поверхности, так и перемещение в объеме обусловлены родственными физическими механизмами, так что независимое варьирование величин α и D едва ли возможно или, может быть, связано с ограничениями.

При низких уровнях α , т.е. не малых значениях λ относительно высокий уровень n поддерживается вплоть до перехода ко второй стадии. Рубежное значение $n = n_m$ согласно (11) может не слишком значительно отличаться от n_0 , особенно для небольших толщин b . Правда, при этом длительность первого этапа t_m (17) тоже невысока.

Для обеспечения длительной работы МПК в режиме, близком к оптимальному, желательны низкие значения параметра α . Имея в виду, что

$$a \approx \frac{1}{\tau} e^{-\frac{U}{k_B T}},$$

где τ – характерное время,

U – энергии связи с поверхностью, следует рекомендовать ограничение уровня температур.

Последнее, разумеется, входит в противоречие со стремлением к повышению эмиссионного тока. Едва ли может быть указан безусловный приоритет того или иного условия: требуется поиск компромиссов между двумя альтернативными температурными тенденциями.

Также требуется подбор основных материалов МПК или отработка соответствующих технологий, обеспечивающих пониженные значения α / D .

3.4. Гетерогенные губки (матрицы)

Характеристики материала, в котором имеет место транспорт материала активатора – фактор, безусловно влияющий на работу или, вообще, обеспечивающий возможности реализации обсуждаемых устройств. В предшествующем разделе в качестве главной материальной характеристики выступал параметр D . Варьирование D – один из инструментов оптимизации функционирования устройства. Дополнительные возможности в этом отношении могут быть связаны с искусственной пространственной неоднородностью материальных характеристик (D и др.) в рабочем объеме эмиттера. Технологически привлекательный и практически не вводящий серьезных ограничений вариант упомянутой гетерогенности – составная губка (матрица) эмиттера, представляющая собой сочленение нескольких слоев различающихся материалов. Подобные структуры получили название «сэндвич» [5]. Кусочно-неоднородные матрицы такого вида обеспечивают возможности практически неограниченного варьирования их параметров. Обращаемся к обсуждению наиболее простого объекта, сохраняющего кусочную неоднородность, т.е. составленного из двух слоёв. Для упрощения исключим из обсуждения чисто геометрические характеристики тыльного слоя, т.е. формально считаем его полубесконечным.

В рамках схематизации предыдущего пункта распределения в двузонной структуре аппроксимируется кусочно-линейными зависимостями, что проиллюстрировано на рис. 2.

Принято, что во внешнем слое, содержащем эмитирующую поверхность, распределение соответствует картине второй стадии долговременного перераспределения (для тонкого слоя это достигается достаточно быстро, смотри (17)). Начальный этап охватывается предыдущими построениями (в соответствии с диффузионной теорией границы раздела сред с различающимися характеристиками) и описывается равенством

$$D_1 \frac{dn_1}{dx} = D_2 \frac{dn_2}{dx},$$

что задает излом функции $n(x)$ на этой координате.

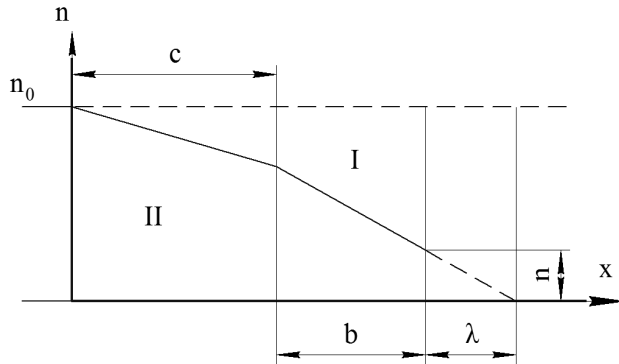


Рис. 2. Схематическое изображение распределения объемной плотности активатора в двузонной структуре типа «сэндвич»

Функция $Q(t)$ здесь такова

$$Q = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{(b+\lambda)^2}{\lambda} - \lambda \right] n - \lambda' \frac{\left(n_0 - \frac{b+\lambda}{\lambda} n \right)^2}{n} \right\} S + Q_2,$$

где Q_2 – начальный запас активатора во второй зоне,

$$\lambda' \equiv \frac{D_2}{\alpha a}.$$

Обращаясь к соответствию (7), получаем уравнение для функции $n = n(t)$. Оно легко интегрируется, что приводит к трансцендентному соотношению

$$\left[\frac{b^2 + 2b\lambda}{\lambda} - \frac{\lambda'}{\lambda^2} (b+\lambda)^2 \right] \ln \frac{n}{n_m} - \frac{\lambda' n_0^2}{2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_m^2} \right) = -2\alpha a (t - t_m), \quad (18)$$

$t > t_m.$

Величины t_m и n_m задаются выражениями (11), (17).

Случай $\lambda' = \lambda$ возвращает нас к картине процесса, аналогичной первой стадии эволюции распределения в однородном ограниченном объекте. Искомая функция при этом такова

$$n = \frac{n_0}{\sqrt{\frac{n_0^2}{n_m^2} + 4 \frac{\alpha a}{\lambda} (t - t_m)}}. \quad (19)$$

Если же $\lambda' \rightarrow 0$, что соответствует низкой диффузионной подвижности во второй среде, то зависимость $n(t)$ уподобляется второй стадии процесса в гомогенном объекте. Последнее не удивительно, т.к. зона с низкой подвижностью в пределе не отличается от полностью замороженной структуры.

Более интересен случай $\lambda' \gg \lambda$, представляющий вариант с относительно низкой подвижностью в слое, примыкающем к эмиссионной поверхности.

Если обозначить

$$n = n_m - g, \quad g \ll n_m,$$

то уравнение (18) в линейном по g приближении, т.е. на временном интервале, примыкающем к n_m определяет результат

$$n = n_m - 2 \frac{D_1}{b^2 + 2b\lambda} n_m (t - t_m). \quad (20)$$

Это значит, что в этой области происходит весьма медленное (пропорционально $D_1 \ll D_2$) убывание концентрации на поверхности, что есть предпосылка к поддержанию режима близкого к оптимальному. Примечательно, что выражение (20) не содержит параметра λ' , несмотря на то, что в уравнении (18) соответствующее слагаемое преобладает. Причина этого в том, что темп переноса во всей структуре задает первая зона.

Дальнейшее развитие событий отвечает так же довольно медленному понижению уровня n . На этом этапе характеристики процесса чувствительны к значению λ' . При сохранении главных слагаемых уравнения (18) получается

$$n(t) = \frac{n_m}{\sqrt{1 + \frac{4\alpha a}{\lambda'} \frac{n_m^2}{n_0^2} (t - t_m)}}. \quad (21)$$

Структурно формула (21) не отличается от выражений (16) и (19), но количественно она представляет существенно более медленный (в прикладном смысле довольно устойчивый) процесс в силу множителя λ' вместо λ , а сравнительно с (16) до-

полнительно, и вследствие наличия фактора $(n_m/n_0)^2$, который заведомо меньше единицы или, может быть, весьма мал сравнительно с единицей.

Снижение уровня n сопровождается уменьшением и временной производной от n , причем относительно более стремительным, нежели n . Это следует рассматривать как тенденцию приближения к установившемуся режиму. Однако в рамках используемой здесь приближенной схемы истинная стационарность не достигается.

Выводы

Предложена объемная диффузионная модель металлопористых катодов, позволяющая анализировать влияние макроструктуры губки и других параметров на их эмиссионную способность.

Показана целесообразность проектирования МПК с гетерогенной структурой матрицы типа «сэндвич», которая позволяет повысить эффективность катодов. Однако это вероятное улучшение не обеспечивается автоматически, а требует согласования всего набора параметров.

Авторы видят следующие перспективные направления развития представленной математической модели МПК и продолжения анализа:

- для ограниченной с обеих сторон структуры с полным отражением на тыльной грани, задача решается введением неограниченного числа дополнительных фиктивных источников одинаковой мощности (точные аналитические решения);

- дискретное представление второй производной $\frac{d^2n}{dk^2} \approx \frac{1}{h^2}(n_{k-1} - 2n_k + n_{k+1})$ с введением произ-

водящей функции $G = \sum_k n_k e^{iks}$ позволяет полно-

стью решить задачу довольно просто (приближенно-аналитические построения любой точности);

- дискретное представление по обеим переменным, т.е. дополнительно

$$\frac{dn}{dt} \approx \frac{1}{t}(n_{p+1} - n_{p-1}) \quad \text{или} \quad \frac{dn}{dt} \approx \frac{1}{\tau}(n_p - n_{p-1})$$

сводит уравнение к виду, где значения n_p находятся с помощью элементарной рекуррентной процедуры.

Литература

1. Нергард, Л.С. Физика катода. Термоэлектронные катоды [Текст] / Л.С. Нергард // Эффективные термокатоды. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – Вып.3. – С. 57 – 63.
2. Термоэлектронные катоды [Текст] / Г.А. Кудинцева, А.И. Мельникова, А.И. Морозов, Б.П. Никонов. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 368 с.
3. Ашкинази, Л.А. Результаты в области термо- и вторично-электронных катодов за 1990–2012 годы [Электронный ресурс] / Л.А. Ашкинази. – Режим доступа: http://lit.lib.ru/a/ashkinazi_l_a/text_0070.shtml. – 05.10.2012 г.
4. Оранский, А.И. Перспективные катоды электроракетных двигателей [Текст] / А.И. Оранский // Авиационно-космическая техника и технология. Сер. Двигатели и энергоустановки: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Х.: ХАИ, 2002. – Вып. 31. – С. 257 – 259.
5. Оранский, А.И. Газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды [Текст]: моногр. в 4 т. / А.И. Оранский, А.С. Долгов, А.А. Таран.; под ред. А.И. Оранского, – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – Т. 1: Основы проектирования. – 256 с.
6. Скрылева, В.М. Металлопористые катоды. Состояние теории и эксперимента [Текст] / В.М. Скрылева. – М.: ЦНИИ электроники, 1976. – 94 с.
7. Модель динамики пленки активатора в полом катоде с металлопористым эмиттером [Текст] / Г.К. Бахмет, А.С. Долгов, С.Ю. Нестеренко, А.И. Оранский // Источники и ускорители плазмы: межвуз. темат. сб. науч. тр. – Х.: ХАИ. – 1982. – Вып. 6. – С. 85 – 89.
8. Оранский, А.И. Исследование процессов, определяющих эмиссионную способность плазменных полых катодов [Текст] / А.И. Оранский // Не накаливаемые катоды: тез. докл. Всесоюз. симпозиума, 21 – 26 августа 1980. – Томск, 1980. – С. 104 – 105.
9. Влияние активатора на эмиссионные свойства катодов [Текст] / А.С. Долгов, А.И. Оранский, В.А. Романко, Б.И. Гордиенко // Конструирование и производство летательных аппаратов и двигателей: межвуз. темат. сб. науч. тр. – Х.: ХАИ. – 1986. – Вып. 4. – С. 32 – 37.

Поступила в редакцию 01.11.2012

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., директор И.Е. Гаркуша, Институт физики плазмы Национального научного центра «ХФТИ» НАН Украины, Харьков.

АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ДОЦІЛЬНОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ МЕТАЛОПОРИСТИХ КАТОДІВ З ГЕТЕРОГЕННОЮ СТРУКТУРОЮ МАТРИЦІ ТИПУ «СЕНДВІЧ»

А.С. Долгов, А.І. Оранський, Д.А. Оранська

Розроблена дифузійна математична модель металопористих катодів (МПК) з використанням об'ємної щільності атомів активатора на робочій поверхні, що дозволяє аналізувати вплив макроструктури губки і інших параметрів катодів на їх емісійну здатність, з урахуванням довготривалих змін розподілу активатора в основному матеріалі емітера. Показано, що застосування гетерогенних структур матриці типу «сандвіч» можуть забезпечити підвищення ефективності МПК, проте для цього потрібно узгодження всього набору параметрів катодів. Запропоновано перспективні напрями розвитку даної моделі і продовження аналізу.

Ключові слова: металопористі катоди, «сандвіч», електронна емісія.

ANALYTICAL EVALUATION OF THE FEASIBILITY OF DESIGNING METALLOPORED CATHODES WITH A HETEROGENEOUS STRUCTURE OF THE MATRIX OF THE "SANDWICH"

A.S. Dolgov, A.I. Oranskiy, D.A. Oranskaya

The diffusion model of metallopered cathodes (MPC) using the bulk density of the activator on the emitting surface has been developed, and this model analyzes the influence of macrostructured sponges and other parameters on their cathode emission capability, considering the long-term changes in the distribution of the activator material emitter. It is shown that the use of heterogeneous structures of the matrix of the "sandwich" type can improve the efficiency of the MPC, but this would require coordination of the whole set of parameters of cathodes. Offered perspectives for the development of the model and continue the analysis.

Keywords: metallopered cathodes, sandwich, electron emission.

Долгов Анатолий Сергеевич – канд. физ.-мат. наук, доц., доцент кафедры Двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Оранский Анатолий Иванович – д-р техн. наук, проф., профессор Межотраслевого научно-технического центра космической энергетики и двигателей (МНТЦ КЭД), Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Оранская Дарья Анатольевна – аспирант кафедры физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: oranskaya.darya@yandex.ua.