
УДК 621.325:537.525

И. В. Мельник, д-р. техн. наук, **С. Б. Тугай**, аспирант
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический ин-т»,
(Украина, 03056, Киев, пр. Победы, 37, корп. 12,
тел. (044) 406-82-92, 454-95-05, e-mail: imelnik@edd.ntu-kpi.kiev.ua)

Моделирование геометрии границы анодной плазмы в триодных электродных системах высоковольтного тлеющего разряда с использованием компьютерного анализа изображений

Предложена методика определения геометрии границы анодной плазмы в триодных электродных системах высоковольтного тлеющего разряда, основанная на компьютерном анализе фотографий разрядного промежутка. Проанализированы электронно-оптические свойства разрядного промежутка и оценены фокальные параметры формируемого электронного пучка. Установлена перспективность разработки мощных импульсных источников электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда и их внедрения в современные электронно-лучевые технологии.

Запропоновано методику визначення геометрії межі анодної плазми у триодних електродних системах високовольтного тліючого розряду, базовану на комп'ютерному аналізі фотографій розрядного проміжку. Проаналізовано електронно-оптичні властивості розрядного проміжку та оцінено фокальні параметри електронного пучка, який формується. Встановлено перспективність розробки потужних імпульсних джерел електронів на базі високовольтного тліючого розряду та їхнього впровадження у сучасні електронно-променеві технології.

Ключевые слова: электронно-лучевые технологии, электронная оптика, источники электронов высоковольтного тлеющего разряда, анодная плазма, компьютерный анализ изображений, аппроксимация, распознавание образов.

Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) широко применяются в промышленности при выполнении технологических операций сварки, пайки, нанесения керамических покрытий, а также для очистки тугоплавких материалов при вакуумной плавке [1—3]. Это обусловлено следующими несомненными преимуществами технологических источников электронов ВТР над традиционными электронными пушками с накаливаемыми катодами:

возможность работы в низком и среднем вакууме, что в значительной степени упрощает электронно-лучевое технологическое оборудование и уменьшает его стоимость;

возможность работы с различными технологическими газами, включая активные, что расширяет диапазон выполняемых технологических операций;

простота управления энергетическими параметрами формируемого электронного пучка посредством изменения рабочего давления в камере пушки.

Основным недостатком источников электронов ВТР является малая плотность тока с поверхности охлаждаемого катода, в стационарном режиме не превышающая $0,1 \text{ A/cm}^2$ [1]. Ограничения по току пучка являются существенными при реализации многих современных электронно-лучевых технологий, особенно при плавке и испарении тугоплавких металлов и керамических материалов [2]. Обычно требуемый ток электронного пучка в электродных системах ВТР достигается посредством увеличения эмиссионной поверхности катода, однако при этом угол сходимости пучка, для обеспечения его эффективной транспортировки в зону обработки изделия, не должен превышать 45° [4].

В некоторых работах по исследованию физики электронно-лучевого нагрева рассматривается перспективность использования в современных электронно-лучевых технологиях импульсных источников электронов, которые могут обеспечивать бóльшую плотность тока в импульсе, чем источники, работающие в стационарном режиме [5]. В частности, плотность тока источников электронов ВТР в импульсном режиме может достигать $1 - 10 \text{ A/cm}^2$ [1]. Разработка и внедрение в промышленность импульсных источников электронов ВТР в значительной мере способствовала бы развитию технических средств современных электронно-лучевых технологий.

Постановка задачи. Сдерживание темпов развития инженерных исследований в области разработки импульсных газоразрядных источников электронов в значительной степени объясняется отсутствием эффективных методов и средств их математического моделирования. При этом наиболее сложным является анализ самосогласованной электронно-ионной оптики триодных систем ВТР с управляющим электродом. В целом процесс моделирования электронно-оптических свойств электродных систем ВТР достаточно хорошо изучен и основан на использовании следующей методики [6]:

1. Определение положения границы анодной плазмы и ее потенциала.
2. Анализ распределения электрического поля в разрядном промежутке (РП) с использованием метода интегральных уравнений.
3. Расчет плотности тока ионов с поверхности анодной плазмы.
4. Расчет траекторий заряженных частиц.
5. Расчет пространственного заряда.

6. Учет взаимодействия частиц в РП и электродных процессов.
7. Коррекция значений потенциала с учетом пространственного заряда.
8. Расчет траекторий электронов пучка в области анодной плазмы.

Однако численный расчет положения и формы границы анодной плазмы, которая в электродных системах ВТР рассматривается как источник ионов и как прозрачный для электронов электрод, всегда крайне затруднителен, а для сложных конфигураций электродных систем, в том числе для триодных, такой анализ чаще всего невозможен [6]. В связи с этим в работе [7] предложена теоретико-экспериментальная методика анализа электронно-оптических свойств электродных систем ВТР.

В соответствии с этой методикой положение и форма границы анодной плазмы определяется в результате компьютерного анализа фотографий РП, выполненных с использованием экспериментального макета источника электронов. После этого моделирование осуществляется стандартным способом, в соответствии с п. 2—8 описанного выше алгоритма. Такая теоретико-экспериментальная методика оказалась достаточно эффективной и была успешно использована для анализа электронно-оптических свойств диодных электродных систем ВТР.

Проанализируем возможность использования разработанных программных средств, предназначенных для считывания и компьютерной обработки фотографий РП [7—9], при исследовании триодных электродных систем ВТР с управляющим электродом, в том числе импульсных.

Карта яркости РП и методика обработки изображений. Карта яркости РП триодных систем ВТР во многом соответствует карте яркости диодных систем, подробно проанализированной в работе [7]. Основные особенности этой карты яркости следующие.

Светлые и темные области РП разделены границей анодной плазмы в продольном направлении и областью прохождения электронного пучка в поперечном направлении. Поскольку рассматриваются осесимметричные электродные системы, обычно достаточным является анализ только нижней части фотографии, а верхнюю часть можно использовать для проверки полученных результатов. На карте яркости [7] выделено пять областей (рис. 1):

1. Области, затененные электродами, имеющие нулевую яркость.
2. Прикатодная темная область, через которую не проходят электроны пучка (ей соответствует первый уровень яркости).
3. Область анодной плазмы, не пересекаемая электронным пучком (ей соответствует второй уровень яркости).
4. Прикатодная темная область, через которую проходят электроны пучка (ей соответствует третий уровень яркости).

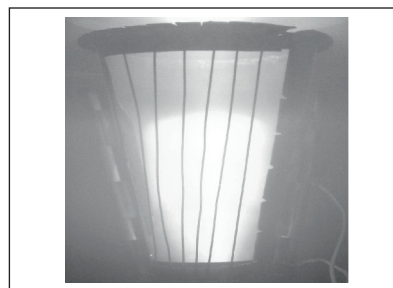
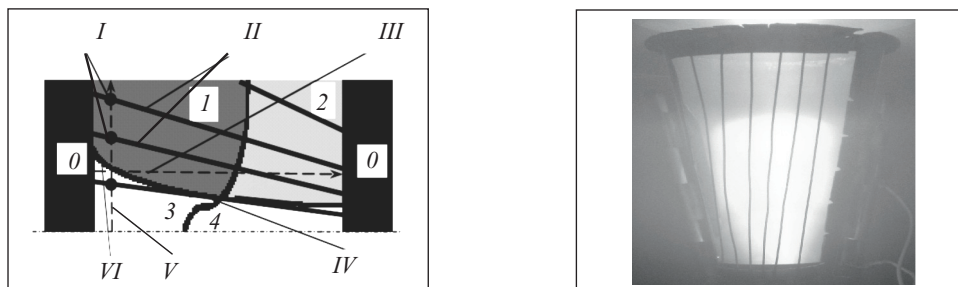


Рис. 1. Карта яркости фотографий РП для анализируемых триодных электродных систем ВТР: 0—4— области; 1— удаляемые темные точки; II— проволоки электрода вспомогательного разряда; III— линия анализа яркости при считывании точек границы анодной плазмы; IV— граница анодной плазмы; V— линия анализа яркости при удалении темных точек; VI— электронный пучок

Рис. 2. Фотография РП в триодной электродной системе ВТР: ток разряда — 100 мА; напряжение на управляющем электроде — 100 В

5. Область анодной плазмы, пересекаемая электронным пучком (ей соответствует четвертый, максимальный, уровень яркости).

Как свидетельствуют результаты практической работы с изображениями РП, различие яркости между точками второй и третьей областей может быть незначительным, что крайне усложняет поиск положения точек плазменной границы, даже при увеличении контраста исходной фотографии. При обработке фотографий яркость точек считывалась вдоль горизонтальных линий, идущих от катода к аноду. Это позволило осуществлять чтение яркости всех точек из соседних ячеек памяти с последовательными адресами, автоматически увеличивая значение адреса на единицу. При этом точки, соответствующие положению границы анодной плазмы, определялись в местах увеличения суммарной яркости изображения, что соответствует переходу либо от области 1 к области 3, либо от области 2 к области 4. При обработке изображений реальные размеры РП и его размеры на фотографии устанавливались в соответствии с положением электродов, иногда для упрощения анализа на анодном электроде ставились штриховые измерительные отметки. Методика определения геометрических размеров на фотографиях РП подробно описана в [7].

Определенные трудности обработки изображений РП ВТР связаны с тем, что конкретные точки изменения яркости, соответствующие положению границы анодной плазмы, не всегда можно четко распознать на фотографии, даже в случае увеличения ее контраста. Кроме того, увеличение контраста фотографии может привести к искажению геометрических размеров темных и светлых областей, что, в конечном итоге, ведет к

возрастанию систематических ошибок при определении геометрии границы анодной плазмы. Поэтому сначала определятся отрезок, соответствующий области увеличения яркости в заданном направлении, после чего предполагается, что положение искомой точки границы анодной плазмы соответствует середине этого отрезка [7].

Такой алгоритм в теории регрессионного анализа называется методом скользящей средней. В случае, когда найденная область увеличения яркости оказывалась слишком большой для корректного определения искомой точки, процесс ее поиска повторялся на соседних линиях для достижения более корректного результата. Кроме того, для проверки точности использовалась нижняя часть фотографии. Все предложенные алгоритмы реализованы с использованием средств программирования системы научно-технических расчетов MatLab и полностью автоматизированы [10, 11].

В целом описанная методика распознавания изображений РП ВТР может быть использована и для анализа триодных электродных систем, в том числе и для импульсных. Достаточно корректной для триодных систем является и карта яркости, приведенная в работе [7]. Тем не менее, существуют определенные особенности проведения экспериментов по фотографированию разряда, которые необходимо учитывать при построении компьютерных алгоритмов обработки фотографий. Основная из этих особенностей состоит в следующем.

Для удержания ионов анодной плазмы в области горения ВТР и для того, чтобы избежать их диффузионного рассеяния, в экспериментальных макетах триодных систем ВТР используются проволочные каркасные электроды вспомогательного разряда. Только используя такие прозрачные каркасные электроды, можно визуально наблюдать процесс горения ВТР и фотографировать РП. Одна из полученных фотографий РП приведена на рис. 2, а соответствующая ей карта яркости — на рис. 1.

На основании изложенного, учитывая особенности приведенной фотографии и карты яркости РП, можно сформулировать такие отличительные черты анализируемых изображений по сравнению с фотографиями открытых диодных систем, рассмотренными в работах [7, 8].

1. В фотографиях триодных систем яркость светлых областей 2 и 4 значительно интенсивней. Этот эффект связан с дополнительной ионизацией и возбуждением молекул рабочего газа во вспомогательном разряде [12].

2. Проволоки электрода вспомогательного разряда формируют дополнительные темные линии, которые усложняют анализ обрабатываемого изображения при использовании стандартных алгоритмов, описанных в работах [7—9].

В связи с указанными особенностями обрабатываемых изображений перед использованием известных алгоритмов, предназначенных для опре-

деления положения точек границы анодной плазмы, необходимо проведение специальной предварительной обработки первичного изображения. В ходе этой обработки следует удалить лишние темные линии, создаваемые проволоками вспомогательного электрода.

Реализация процесса предварительной обработки состояла в следующем.

1. С использованием известных средств обработки фотографий, таких как Adobe Photoshop, Microsoft Photoeditor или Corel Photopaint, увеличивался контраст фотографии посредством уменьшения яркости областей 1 и 2 и увеличения яркости областей 3 и 4. При проведении такого преобразования исходного изображения необходимо следить за тем, чтобы точки, находящиеся на границе светлых и темных областей, сохраняли свое исходное положение.

2. С использованием средств программирования системы MatLab проводилась предварительная обработка полученного изображения, при этом удалялись темные линии, создаваемые проволоками вспомогательного электрода. Обработка изображения происходила по следующему алгоритму. Если в ходе сканирования изображения найдена точка, яркость которой меньше, чем заранее установленный порог яркости, то яркость этой точки заменяется на яркость предыдущей. Суть описанного алгоритма можно понять из рис. 2.

3. Транспонированием матрицы яркостей полученное изображение поворачивалось на 90° против часовой стрелки, и далее его обработка выполнялась по стандартным алгоритмам [7 — 9].

Код программы, реализующий пункты 2 и 3 описанной методики, написанный на языке программирования системы MatLab, следующий.

Пример 1.

```
c=imread('plasma.bmp');
cc=double(c);
nn=length(cc(1,:));
z=0.025:0.01/nn:0.05;
fn=nn/2;
for n=1:fn;
    t=double(c(n,:));
    sd=length(cc(:,n));
    for n2=1:sd;
        if (cc(n,sd))<80;
            (cc(n,sd))=(cc(n-1,sd)); end;
    end;
end;
cc2=cc';
```

```

for n=1:fn;
    tt=double(cc2(n,:));
    nzpl=find(diff(tt)>50);
    nzp(n)=nzpl(1);
    zmaxf(n)=0.025+0.01*nzp(n)/nn;
    zmax2(fn-n+1)=zmaxf(n);
end;
zzmax=[zmaxf,zmax2];
rf=-0.045:0.09/nn:0.045;
zzf=[0.04:0.0001:0.04+(length(cc(1,:))-1)*0.0001];
rff=-0.35:0.007:-0.35+0.007*(length(cc(:,1))-1);
[RR,ZZ]=meshgrid(zzf,rff);
zmax=zzmax(1:3:nn);
r=rff(1:3:nn);
vv=fmins('pbar3pos',[-10 0.1 -0.04]);

```

В приведенном фрагменте программы функция `pbar3pos` получена с помощью командных строк системы MatLab в ходе решения задачи аппроксимации. Используемая методика аппроксимации основана на функциях аналитического процессора. Результат обработки фотографии РП в соответствии с описанной методикой приведен на рис. 3.

При реализации предложенной методики распознавания точек границы плазмы напечатанные фотографии РП сканировались с разрешением не менее 300×300 dpi и запоминались в формате GIF в 24-битовой цветной палитре [13]. При фотографировании на фото пленку использовался пленочный фотоаппарат Ricoh и фото пленка FujiFilm с чувствительностью 400 единиц. Полученные фотографии сканировались с использованием планшетного сканера Acer Scan Prisa 640S. Для получения цифровых фотографий использован фотоаппарат Nikon N900 с разрешающей способностью 2500×2500 точек.

Для упрощения яркостного анализа полученные изображения переводились в формат GIF с оттенками серого цвета. В этом случае яркость каждой точки описывается одним битом, при этом значение 0 соответствует черному цвету, а значение 255 — белому [13]. Для перевода фотографий в черно-белый формат и для увеличения их контраста использованы стандартные средства программ обработки изображений Adobe Photoshop, Microsoft Photoeditor и Corel Photopaint.

Естественно, при наведении контраста и удалении темных линий, формируемых проволоками управляющего электрода, возникают определенные систематические ошибки обработки первичных изображений [14]. Тем не менее, как видно из рис. 3, размер пятен, возникающих в процессе

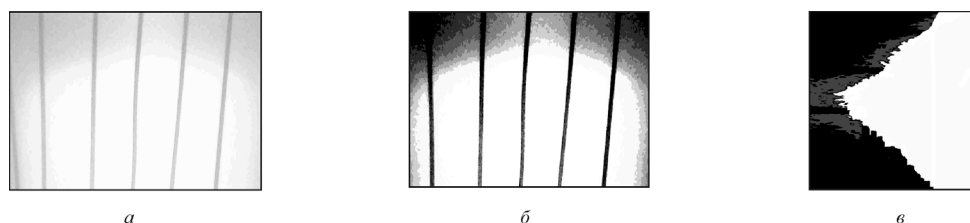


Рис. 3. Этапы процесса обработки фотографии РП: *a* — исходная фотография; *б* — после увеличения контраста; *в* — после удаления темных линий, создаваемых проволоками электрода вспомогательного разряда; ток разряда — 100 мА; напряжение на управляющем электроде — 100 В

обработки фотографии, не превышает диаметра проволок, который обычно составляет менее 1 мм. При такой величине абсолютной ошибки относительная погрешность определения точек границы анодной плазмы не превышает долей процента.

Аппроксимация границы анодной плазмы. В работах [8, 9] показано, что практически для всех режимов горения ВТР геометрия границы анодной плазмы может быть описана с помощью полуэмпирического соотношения

$$z(r) = A \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha}\right) + B, \quad (1)$$

где A , B и α — полуэмпирические коэффициенты, определяемые аппроксимацией отсчетных значений $z(r)$ в процессе обработки фотографии. При этом методика аппроксимации геометрии границы анодной плазмы основана на использовании средств обработки математических выражений аналитического процессора системы MatLab [10, 11].

В предлагаемой методике аппроксимации используется стандартное уравнение регрессии, основанное на методе наименьших квадратов [10, 11]:

$$F(r_1 \dots r_n)|_{\min} = \sum_{i=1}^n (f(r_i) - z_i)^2|_{\min}, \quad (2)$$

где r_i — точки отсчета по радиальной координате; n — число этих точек; z_i — заданные значения функции; $f(r_i)$ — аппроксимированные значения функции.

Основная проблема решения аппроксимационных задач состоит в том, что эффективных универсальных алгоритмов поиска минимума функции регрессии $F(r_1 \dots r_n)$ для любой функции $f(r_i)$ с неопределенными коэффициентами, аналогичной функции (1), не существует. Градиентные чис-

ленные методы очень ресурсоемки и не всегда обеспечивают устойчивую сходимость итерационных процедур, а перебор значений коэффициентов на заданном промежутке обычно связан с неоправданными вычислительными затратами [15]. Для степенных и экспоненциальных функций задача аппроксимации иногда существенно упрощается вследствие линеаризации нелинейной функции регрессии (2) методом логарифмирования [14]. При использовании этого метода существенно уменьшаются и вычислительные погрешности, так как отпадает необходимость обработки слишком больших и слишком малых чисел. Однако этот метод пригоден только для определенного класса математических функций, поэтому и его нельзя назвать универсальным.

Задача аппроксимации существенно упрощается, если эффективно использовать современные системы автоматизации научно-технических расчетов, позволяющие сначала выполнять аналитические преобразования функций, а затем численно решать для этих функций оптимизационные задачи [10, 11]. В этом случае может быть использован следующий универсальный алгоритм решения уравнения регрессии (2).

1. Задаются векторы входных данных для значений аргумента и функции. В рассматриваемом случае ими являются значения координат соответственно r и $z(r)$.

2. Задается функция аппроксимации с неизвестными коэффициентами. Например, для описания геометрии границы анодной плазмы используется функция (1) и минимизация функции регрессии (2) проводится по параметрам A , B и α . При этом исходные значения переменных r и z также подставляются в уравнение регрессии (2).

3. В результате аналитических преобразований, осуществляемых через командную строку системы MatLab, находится упрощенное аналитическое выражение для функции регрессии (2).

4. Проводится поиск минимума функции регрессии по заданному числу переменных, в данном случае — по трем переменным. Например, в системе MatLab для поиска минимума функции от нескольких переменных можно эффективно использовать стандартные процедуры `fmins` или `fminsearch`, в зависимости от используемой версии системы [10, 11].

Основные особенности использования функции `fmins` при решении задачи аппроксимации геометрии границы анодной плазмы представлены в примере 1. Командные строки аналитического процессора системы MatLab, позволяющие привести уравнение регрессии (2) к сумме простых алгебраических выражений, содержащих экспоненциальные функции, приведены в следующем примере.

Пример 2.

```
К» syms A B rr alfa
К» zapr=A*exp(-(rr.^2/alfa))+B;
К» la1=sum((subs(zapr,rr,r)-zmax).^2);
К» expand (la1)
```

Математическое выражение, полученное в результате работы аналитического процессора, является основой для формирования функции $pbarzpos$, минимум которой соответствует искомым значениям коэффициентов A , B и α в уравнении (1).

Ранее была исследована также возможность аппроксимации геометрии границы анодной плазмы для некоторых триодных систем ВТР. В частности, для систем с кольцевым электродом, находящемся в анодной полости под положительным потенциалом [12], предложено использовать следующее аппроксимационное соотношение [9]:

$$z(r) = (Ar^2 + B) \exp\left(-\frac{r^2}{C}\right) + D, \quad (3)$$

где A , B , C и D — полуэмпирические коэффициенты.

Следовательно, для большинства реальных диодных и триодных электродных систем ВТР комбинация экспоненциальной функции и полиномов позволяет достичь достаточно высокой точности аппроксимации геометрии границы анодной плазмы. При решении практических задач погрешность аппроксимации составляла не более нескольких процентов.

Результаты моделирования и их анализ. На рис. 4 приведены результаты аппроксимации границы плазмы для обработанного изображения, представленного на рис. 3, в. Аппроксимация проводилась с использованием соотношения (1), полученные коэффициенты которого имели следующие значения: $A = -2,51$ м; $B = 2,5367$ м; $\alpha = 0,3602$ м². Исследования проводились на экспериментальном макете для электродной системы таких размеров: высота анода — $h_a = 75$ мм; диаметр основания анода — $d_a = 45$ мм; расстояние от поверхности катода до анодного основания — $d_{к.а} = 15$ мм.

Из приведенных результатов моделирования видно, что разработанная методика аппроксимации геометрии границы анодной плазмы позволяет не только описывать реальные точки, считанные с фотографии, но иногда в значительной степени компенсирует зашумленность исходных изображений. В некоторых случаях аппроксимированные значения в большей степени соответствуют физическим параметрам, чем результаты эксперимента, которые могут иметь соответствующую методическую погрешность [14].

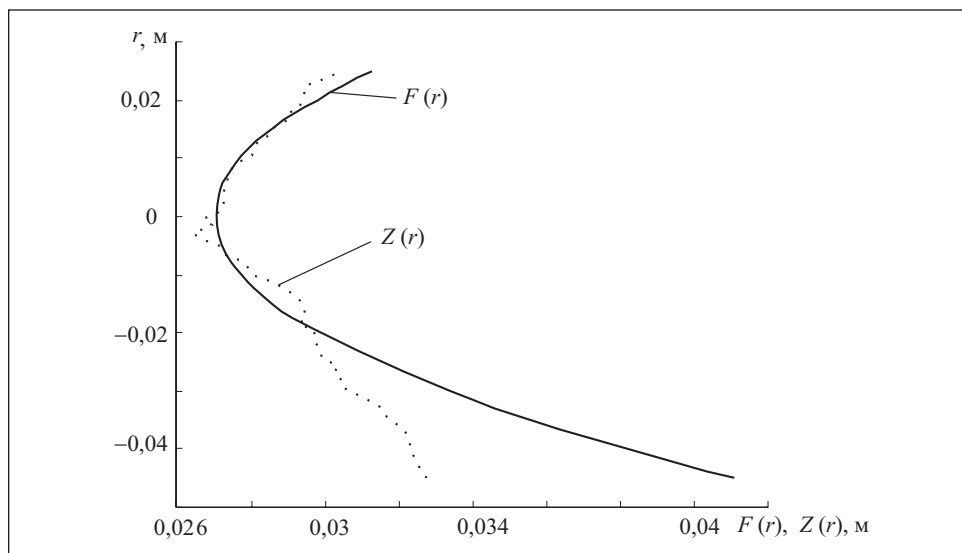


Рис. 4. Аппроксимация геометрии границы анодной плазмы для фотографии, приведенной на рис. 1: $Z(r)$ — точки границы плазмы, считанные с фотографии; $F(r)$ — аппроксимированные значения

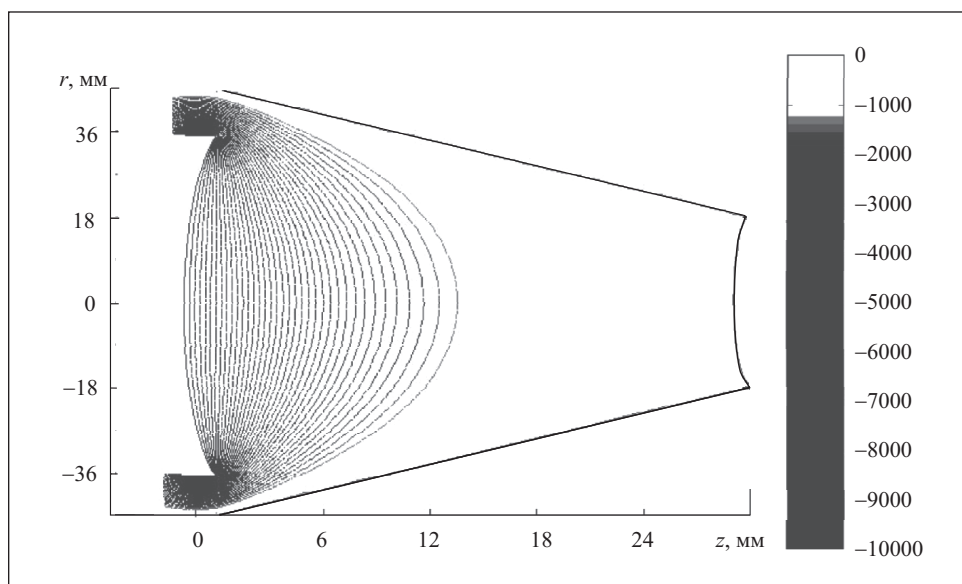


Рис. 5. Распределение электрического поля в триодной системе ВТР: ток разряда — 100 мА; напряжение на управляющем электроде — 100 В

Например, в рассмотренном случае экспериментальная кривая имеет экстремум в точке $r = 0,025$ м, тогда как функция аппроксимации является четной и ее экстремум соответствует значению $r = 0$. Только с помощью четных функций можно описывать реальные свойства аксиально-симметричных электродных систем. Распределение электрического поля для моделируемой электродной системы приведено на рис. 5. Время решения электронно-оптической задачи на процессоре Pentium IV 1,1 МГц при объеме оперативной памяти 512 Мб составляло не более 0,5 ч.

Результаты моделирования показали, что фокальный диаметр электронного пучка в триодных электродных системах ВТР может быть в 1,5—2 раза большим, чем в соответствующих диодных системах, что, прежде всего, обусловлено особенностями геометрии границы анодной плазмы. Тем не менее, для реальных оптимизированных триодных систем диаметр электронного пучка в фокусе при силе тока, равной сотням миллиампер, может составлять несколько миллиметров. Такие параметры пучка являются приемлемыми для многих процессов современных электронно-лучевых технологий [2, 16].

Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными оценивалось по фокальным параметрам электронного пучка и составляло не более 30 %. Полученная относительно высокая точность расчета фокальных параметров формируемого электронного пучка обусловлена, прежде всего, использованием экспериментальных данных для определения геометрии границы анодной плазмы.

Выводы

Разработанная методика моделирования триодных электродных систем ВТР основана на использовании компьютерного анализа фотографий РП для определения геометрии границы анодной плазмы и на решении самосогласованной задачи электронно-ионной оптики при заданных граничных условиях. Преимуществами разработанной методики является ее экономичность относительно использования компьютерных ресурсов при достаточно высокой точности расчетов относительно экспериментальных данных. Результаты проведенного тестирования разработанных средств моделирования свидетельствуют о том, что расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет не более 30 %.

Полученные результаты подтверждают перспективность разработки импульсных источников электронов ВТР и возможность их внедрения в современных электронно-лучевых технологиях. В настоящее время основными областями применения импульсных источников электронов на ос-

нове ВТР могут быть электронно-лучевые технологии нанесения композитных покрытий и вакуумный электронно-лучевой переплав тугоплавких металлов [2, 3, 16].

A method for defining the anode plasma boundary geometry in high-voltage glow discharge triode electrode systems, based on computer analysis of the discharge gap photograph, is considered in the article. Electron-optical properties of the discharge gap are analysed and focal parameters of the formed electron beam are also estimated. The above investigations confirm the prospects of elaboration of powerful pulse electron sources based on high-voltage glow discharge. Such sources can be widely used in the modern electron beam technologies.

1. *Плазменные процессы в технологических электронных пушках / Завьялов М.А., Крейндель Ю. Е., Новиков А. А., Шантурин Л. П.* — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.
2. *Ладохин С. В., Левицкий Н. И., Чернявский В. Б. и др.* Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. — Киев : «Сталь», 2007. — 605 с.
3. *Денбновецкий С. В., Мельник В. И., Мельник И. В., Тугай Б. А.* Газоразрядные электронные пушки и их применение в промышленности // *Электроника и связь. Тематический вып. «Проблемы электроники», ч. 2.* — Киев: изд-во «Политехника»,— 2005. — С. 84—87.
4. *Денбновецкий С. В., Мельник В. И., Мельник И. В., Тугай Б. А.* Моделирование транспортировки короткофокусных электронных пучков из низкого в высокий вакуум с учетом разброса тепловых скоростей электронов // *Прикладная физика.*— 2010. — № 3. — С. 84—90.
5. *Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А.* Основы электронно-лучевой обработки материалов. — М. : Машиностроение, 1978. — 239 с.
6. *Мельник И. В., Тугай С. Б.* Методика моделирования технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда // *Электрон. моделирование.* — 2010. — **32**, № 3. — С. 31—43.
7. *Мельник И.В.* Исследование электронно-ионной оптики электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с использованием методов компьютерного анализа изображений // Там же. — 2007. — **29**, № 1. — С. 45—58.
8. *Денбновецкий С. В., Мельник В. И., Мельник И. В., Тугай Б. А.* Аппроксимация положения и формы границы анодной плазмы в источниках электронов высоковольтного тлеющего разряда // *Электроника и связь. Тематический вып. «Электроника и нанотехнологии», ч. 1.* — 2009. — С. 83—88.
9. *Мельник И. В., Тугай С. Б.* Исследование электронно-оптических свойств триодных электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с учетом положения и формы границы анодной плазмы // *Электроника и связь.* — 2011. — № 2 (61). — С. 9—13.
10. *Мельник І. В.* Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: Навч. посіб. у 2-х томах. Т. 1. Основи роботи та функції системи. — Київ: Університет «Україна», 2009. — 507 с.
11. *Мельник І. В.* Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: Навч. посіб. у 2-х томах. Т. 2. Основи програмування та розв'язання прикладних задач. — Київ : Університет «Україна», 2009. — 327 с.

12. *Denbnovetsky S. V., Melnik V.I., Melnik I. V., Tugay B. A.* Investigation of Forming of Electron Beam in Glow Discharge Electron Guns with Additional Electrode// XVIII-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). August 17—21, 1998 // XVIII ISDEIV Proc. Vol. 2. — The Netherlands Eindhoven, Technical University, 1998. — P. 637—640.
13. *Романов В. Ю.* Популярные форматы хранения графических изображений. — М. : Унитех, 1992. — 156 с.
14. *Володарский Е. Т., Малиновский Б. Н., Туз Е. М.* Планирование и организация эксперимента. — Київ : Вища школа, 1987. — 280 с.
15. *Васильев В. П.* Численные методы решения экстремальных задач: Уч. пос. для вузов. — М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1988. — 552 с.
16. *Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З.* Электронно-лучевая технология. — М. : Энергия, 1980. — 528 с.

Поступила 05.09.11

МЕЛЬНИК Игорь Витальевич, д-р техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т». В 1989 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — моделирование электронно-лучевых технологических устройств, теория газового разряда, программирование и теория алгоритмов.

ТУГАЙ Сергей Борисович, аспирант кафедры электронных приборов и устройств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т», который окончил в 2002 г. Область научных исследований — моделирование и проектирование электронно-лучевых технологических устройств, системы управления электронно-лучевым технологическим оборудованием.