

## **Ионный поток на проводящую и изолированную поверхности в пучково-плазменном разряде: компьютерная модель**

*И. Л. Клыков, Е. Г. Шустин*

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,  
г. Фрязино Московской обл., Россия

*В. П. Тараканов*

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*Разработана физическая модель, позволяющая применять компьютерный код KAPAT для моделирования квазистационарного состояния пучково-плазменного разряда с регенерацией плазмы из нейтрального газа. Представлены результаты моделирования режимов с различными потенциалами на коллекторе разряда. Приведено сравнение результатов для "изолированных" и заземленных приемников ионов.*

PACS: 41.75.-i; 52.25.-b

*Ключевые слова:* плазменно-пучковый разряд, моделирование, код, регенерация, плазма, нейтральный газ.

### **Введение**

В работах [1, 2] приведен обнаруженный экспериментально эффект ускорения ионов, выле-

тающих из области пучково-плазменного разряда (ППР) в слабом магнитном поле в направлении, нормальном к оси разряда. Проведены экспериментальные исследования потока получаемых та-

ким образом ионов и зависимость их параметров от внешних параметров. Обнаружено, что энергию ионов можно регулировать в пределах 20—100 эВ. Потоками ионов таких энергий можно решать ряд технологических задач по травлению поверхностей материалов, используемых в микро- и нанoeлектронике. Травление ионами из ППР обладает высокой степенью анизотропии и не вносит радиационных дефектов. Важными для технологических задач характеристиками ионных потоков являются их функция распределения по энергиям (ФРИЭ) и их плотность. В работе [2] показана зависимость ФРИЭ от таких параметров, как напряжение на коллекторе, ускоряющее напряжение и величина внешнего магнитного поля. Актуальной задачей является поиск простого способа управления ФРИЭ в целях получения стабильного потока ионов с заданной энергией и плотностью.

В работе [3] методом компьютерного моделирования выявлен физический механизм указанного выше явления. Моделирование показало, что в ППР развиваются широкополосные стохастические колебания. В области, занятой электронным пучком, формируется сильнонеравновесная плазма. Электроны этой области создают дополнительный ток из плазмы на торцевые электроды, увеличение электронного тока приводит к росту потенциала плазмы в области, занятой пучком. В свою очередь градиент потенциала между данной областью и периферией плазмы определяет ускорение потока ионов по нормали к оси системы. Проведенные эксперименты подтвердили результаты моделирования. В работе [3] изучалась начальная стадия развития неустойчивости при инжекции импульсного пучка в независимо созданную плазму. Такой подход ограничивал время анализа до 50—100 нс, так как плазма быстро уходила на стенки. В физических экспериментах, направленных на создание технологии плазменной обработки поверхности материалов, исследуются характеристики стационарного или квазистационарного режима ППР. Поэтому сравнение результатов указанных работ возможно только качественное, в связи с чем была поставлена задача по разработке модели для кода КАРАТ, позволяющая проанализировать квазистационарный режим разряда.

Согласно экспериментальным данным [2], изменение величины постоянного потенциала на торцевом коллекторе позволяет управлять ФРИЭ. Для изучения и оптимизации таких режимов ППР модель была уточнена и дополнена.

Ниже приводятся результаты моделирования квазистационарного состояния различных режимов ППР в слабом магнитном поле.

### Используемая модель

Использовалась двумерная осесимметричная версия кода КАРАТ. Исследуемый объем представляет собой цилиндр радиусом 5 и длиной 20 см, слева на оси системы расположена область эмиссии, имитирующая диодную пушку Пирса, используемую в экспериментах. Из нее инжектируются электроны вдоль оси с начальной энергией 2 кэВ. Радиус пучка составляет 1 см при токе эмиссии 0,5 А. Силовые линии магнитного поля параллельны оси системы, само поле однородно и его величина составляет 20 Гс (значения взяты по экспериментальным данным [2]).

Добавлен дополнительный приемник ионов на расстоянии 5 см по оси  $z$  от плоскости инжекции пучка. Добавление дополнительного электрода обусловлено тем, что по предварительным результатам ранее заданное положение приемника ионов не обеспечивает получение потока с оптимальной ФРИЭ.

Значительным отличием модели от представленной ранее в работе [3] является то, что она имеет возможность изоляции приемников ионов от стенок камеры.

Таким образом, реализован режим, когда приемники находятся под "плавающим" потенциалом. Это связано с необходимостью моделирования реальных технологических задач, когда воздействию ионов, как правило, подвергаются электроизолированные структуры. Изоляция электродов имитируется подключением их к корпусу камеры через сопротивление 1 МОм.

Как указано выше, на ФРИЭ оказывает существенное влияние величина потенциала на торцевом коллекторе, в связи с чем рассматривались случаи с нулевым потенциалом и равным 60 В.

Для регенерации плазмы в модель добавлен нейтральный газ заданной плотности. В отличие от предыдущей бесстолкновительной модели здесь учитываются упругие и неупругие столкновения. Частота столкновений взята из стандартных табличных данных по аргону. Начальная плотность плазмы в модели соответствует эксперименту и составляет  $1 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Температуры ионов и электронов плазмы равны 1 и 10 эВ, соответственно.

Для уменьшения времени счета масса ионов взята равной 40 массам электронов, в предыдущей модели это отношение принималось равным 400. Проводившиеся ранее расчеты показали, что такое приближение не влияет на энергетику, а влияет только на характерные времена.

Критерием стабильности квазистационарного состояния ППР взято условие сохранения числа ионов и электронов плазмы с допустимым изме-

нением не более чем на 10 % от начального числа за время счета (300 нс). Для выполнения этого условия варьировалась плотность нейтрального газа. Для найденного таким образом значения проводились дальнейшие расчеты, которые показали, что при различных потенциалах на торцевом коллекторе скорость ухода плазмы на стенки менялась незначительно.

### Основные результаты

Полученная временная зависимость тока ионов на торцевой коллектор (рис. 1) показывает, что в рамках данной модели стабилизация наступает к 30—50-й нс. С учетом уменьшения модельной массы ионов это показывает, что в предыдущей модели рассматривался режим, предшествующий квазистационарному.

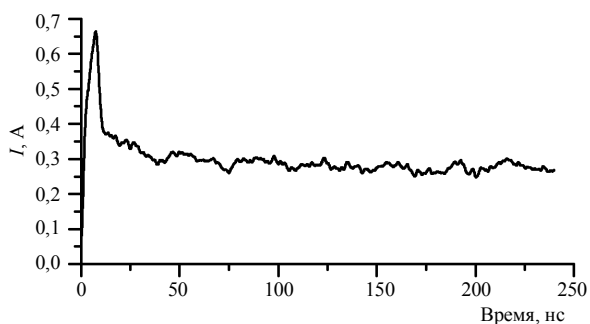


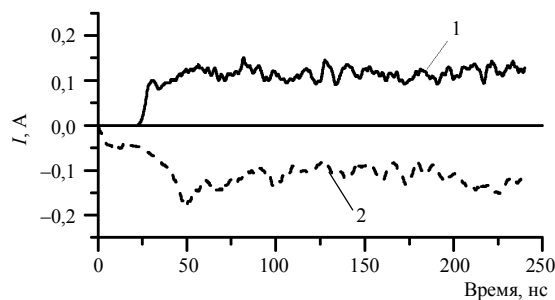
Рис. 1. Ток ионов плазмы на торцевой коллектор в зависимости от времени при нулевом потенциале торцевого коллектора

На рис. 2 представлены временные зависимости токов ионов и электронов плазмы, а также электронов пучка на приемники ионов. Видно, что ионный ток появляется после завершения переходного процесса, когда формируется градиент потенциала между осью и периферией системы. Величина токов во время переходного процесса соответствует таковым в предыдущей модели.

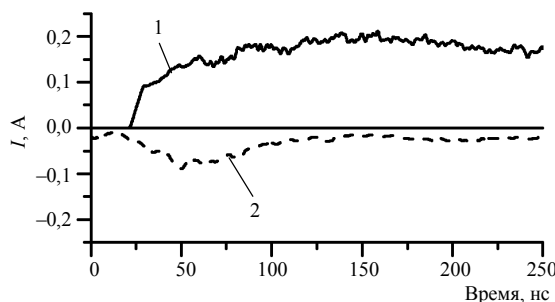
Для случая с нулевым потенциалом на торцевом коллекторе поток ионов на "изолированный" приемник ионов скомпенсирован и плавающий потенциал близок к нулю. Для потенциала 60 В видно, что на заземленном приемнике ионов ток ионов значительно превышает электронный, что в случае с "изолированным" приемником ионов приводит к накоплению на нем заряда, тормозящего ионы.

На рис. 3 представлены кривые ФРИЭ для различных потенциалов коллектора  $U_{col}$  и схем подключения приемника ионов. Из сравнения ФРИЭ в различные моменты времени следует, что в квази-

стационарном режиме средняя энергия ионов ниже и присутствует ярко выраженный пик ФРИЭ. Видно, что для заземленного приемника ионов при подаче потенциала на торцевой коллектор ФРИЭ сдвигается в область более высоких энергий с 25 до 50 эВ, а для "изолированного", напротив, изменяется незначительно (менее чем на 5 эВ), что вызвано накоплением на нем заряда, который тормозит поток ионов.



а



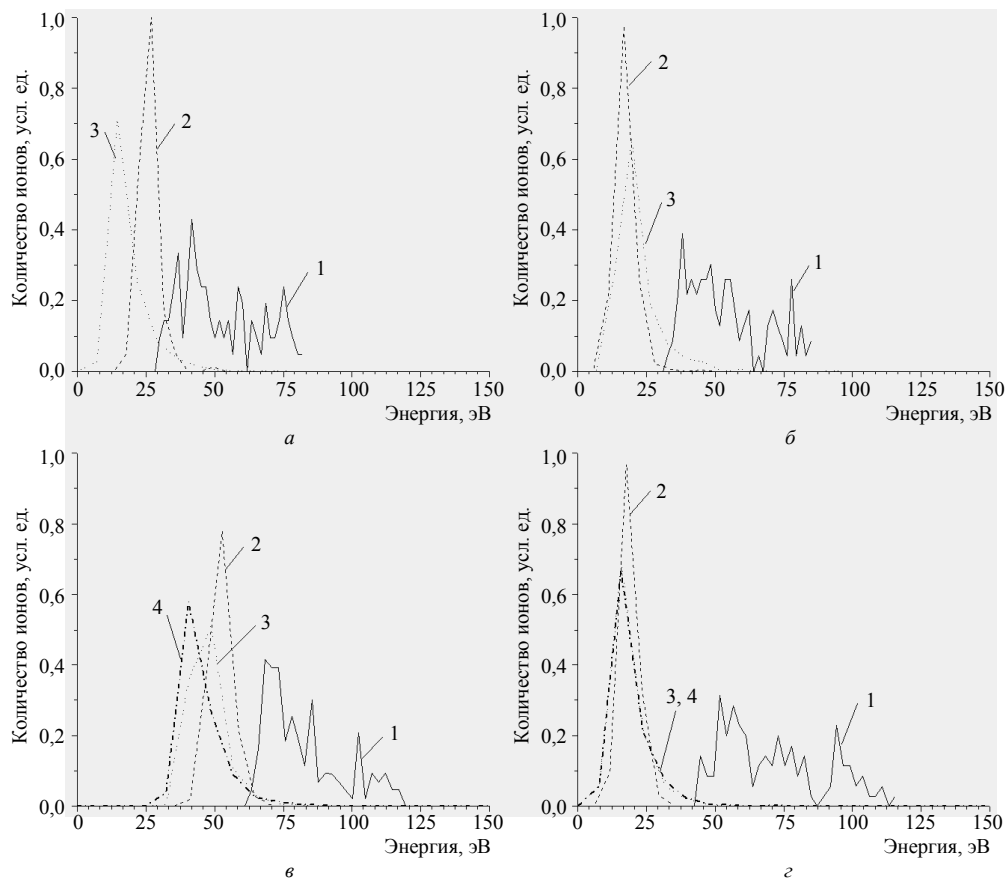
б

Рис. 2. Токи на приемник ионов в зависимости от времени при значениях потенциала на торцевом коллекторе  $U_{col} = 0$  В (а) и  $U_{col} = 60$  В (б):

1 — ток ионов плазмы; 2 — суммарный ток электронов плазмы и пучка

Расчеты подтвердили, что разность потенциалов между осью разряда и поверхностью приемников ионов, отвечающая за ускорение ионов, для "изолированных" приемников ионов слабо зависит от величины потенциала на торцевом коллекторе. В случае заземленных приемников ионов при изменении потенциала на торцевом коллекторе наблюдается значительное увеличение этой разности, что соответствующим образом отражается на ФРИЭ.

Таким образом, можно сделать вывод, что при обработке заземленных образцов ФРИЭ легко управлять, меняя потенциал на торцевом коллекторе. В то же время при обработке электроизолированных подложек метод подачи постоянного напряжения на торцевой коллектор как средство управления ФРИЭ оказывается недостаточно эффективным.



**Рис. 3. Вид ФРИЭ в различные моменты времени:**

*a* —  $U_{col} = 0$  В, приемник ионов заземлен; *б* —  $U_{col} = 0$  В, приемник ионов "изолирован"; *в* —  $U_{col} = 60$  В, приемник ионов заземлен; *г* —  $U_{col} = 60$  В, приемник ионов "изолирован";  
1 — 45 нс; 2 — 150 нс; 3 — 240 нс; 4 — 300 нс

### Заклучение

Показано, что код КАРАТ применим для моделирования квазистационарного состояния ППР с регенерацией плазмы из нейтрального газа. Построена модель, позволившая использовать код для моделирования квазистационарного состояния ППР в различных режимах.

Продемонстрировано, что обнаруженный в бесстолкновительной модели механизм ускорения ионов сохраняется. Представлены результаты моделирования режимов ППР при "изолированных" приемниках ионов, показана недостаточная эффективность в таком случае метода управления ФРИЭ подачей постоянного напряжения на торцевой коллектор.

Для технологических задач востребован метод, который позволит легко управлять ФРИЭ на электроизолированной подложке. Согласно последним

экспериментальным данным [4] этого можно достичь подачей на торцевой коллектор потенциала, осциллирующего с амплитудой 60 В при частотах 50—100 кГц. Такой режим был промоделирован, результаты обрабатываются.

### Литература

1. Исаев Н. В., Чмилев А. И., Шустин Е. Г. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 3. С. 292.
2. Исаев Н. В., Шустин Е. Г., Темиряева М. П., Тараканов В. П., Федоров Ю. В. // Прикладная физика. 2008. № 3. С. 73.
3. Тараканов В. П., Шустин Е. Г. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 2. С. 151.
4. Исаев Н. В., Клыков И. Л., Шустин Е. Г. // Прикладная физика. 2009 № 6. С. 113.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2009 г.

## **Ion flow on conducting and isolated surface in beam plasma discharge: computer model**

*I. L. Klykov, E. G. Shustin*

V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS,  
Fryazino branch, 1 Vvedensky sq., 141190, Fryazino, Moscow Region, Russia  
E-mail: shustin@ms.ire.rssi.ru

*V. P. Tarakanov*

Associated Institute for High Temperatures of RAS, 13, str. 2, Izhorskaya str., 125412, Moscow, Russia  
E-mail: karat@tarak.msk.su

*The model has been developed that allows to use program code KARAT for modeling quasi-stationary state of beam plasma discharge with plasma regeneration by neutral gas. The results of simulation of modes with various potential on a collector of the discharge has been shown. The comparison of results for isolated and grounded ion collectors has been represented.*

PACS: 41.75.-i; 52.25.-b

*Keywords:* beam plasma discharge, modelling, code, regeneration, plasma, neutral gas.

---

**Клыков Илья Леонидович**, аспирант

**Шустин Евгений Германович**, ведущий научный сотрудник

141190, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского 1, ИРЭА, Фрязинский филиал

Тел. (49656) 525-69, факс (495) 702-95-72; E-mail: shustin@ms.ire.rssi.ru

**Тараканов Владимир Павлович**, старший научный сотрудник

125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2, ОИВТ РАН

Тел. (495) 485-79-44, факс (495) 485-79-90; E-mail: karat@tarak.msk.su