

УДК 533.915

## Ионный поток на непроводящую поверхность в пучково-плазменном разряде: расчет и эксперимент

В. А. Курнаев

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия

В. В. Песков, А. И. Чмиль, Е. Г. ШустинИнститут радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,  
г. Фрязино Московской обл., Россия

*Проведен компьютерный расчет модели плазменного слоя у непроводящей поверхности в пучково-плазменном разряде (ППР) при слабом магнитном поле в камере. Правильность результатов компьютерного расчета подтверждена экспериментальными данными. На основе результатов компьютерного расчета выбран оптимальный режим травления GaAs в плазмохимическом реакторе на основе ППР. Проведен также расчет аналогичной модели для режимов напыления алмазоподобных пленок.*

PACS: 41.75.-i; 52.25.-b

*Ключевые слова:* ионный поток, пучково-плазменный разряд, поверхность, расчет, эксперимент.

### Введение

В работе [1] был обнаружен эффект формирования в ППР в слабом магнитном поле ионного потока, распространяющегося от оси разряда перпендикулярно к ней на периферию, и были получены энергетические распределения ионов в слабом магнитном поле.

Возможность создания плазмохимического реактора на основе ППР для модификации поверхности диэлектриков и полупроводников продемонстрирована в работе [2].

В процессе исследования энергетических распределений потока ионов в различных режимах разряда было обнаружено, что поток ионов значительной плотности со средней энергией  $\langle W_i \rangle \sim eU_{col}$  ( $U_{col}$  — потенциал коллектора) может формироваться и при нулевом магнитном поле в камере. Очевидно, что режим без магнитного поля существенно упрощает конструкцию плазмохимического реактора и облегчает его комплексирование с другими технологиями, поэтому при обработке технологических режимов травления исследовались и режимы с  $H = 0$ .

Напомним [2], что при нелинейном развитии пучковой неустойчивости в ограниченном объеме в области, занятой пучком, формируется сильно неравновесная плазма со средней энергией электронов, достигающей сотни электронвольт, при этом функции распределения электронов пучка и плазмы становятся физически неразличимы. Электроны этой области создают дополнительный ток на торцевые электроды. Увеличение электронного тока приводит к росту потенциала плазмы в обла-

сти, занятой пучком; градиент потенциала между областью, занятой пучком, и периферийной областью плазмы определяет ускорение потока ионов по нормали к оси системы. На основе данного эффекта был предложен метод мягкого бездефектного травления поверхности гетероструктур.

В случае с непроводящей поверхностью возникают проблемы с зарядкой ее до плавающего потенциала. В условиях формирования интенсивного некомпенсированного ионного потока поверхность заряжается до положительного потенциала. Таким образом, ионы тормозятся, и травление прекращается.

Для борьбы с этим эффектом было предложено подавать на держатель подложки переменное напряжение [3, 4]. Возникающий на поверхности в части периода этого напряжения положительный потенциал вызывает усиленный ток электронов, компенсирующий заряд поверхности. Подобный режим автоматически реализуется в ВЧ-разрядах, но для данного типа разряда этот метод является оригинальным.

Для оптимизации процесса обработки поверхности необходимо создать модель, которая без проведения трудоемких экспериментов позволит получить информацию о токах и энергиях ионов, падающих на непроводящую поверхность в пучково-плазменном разряде.

Аналогичная задача рассматривается в работе [5], в которой исследуется поведение зонда, погруженного в емкостной ВЧ-разряд, с помощью компьютерного расчета ионных потоков для эквивалентной электрической схемы. Описанный в работе метод дает возможность рассчитывать ион-

ные потоки на зонд в ВЧ емкостном разряде. Однако данный метод позволяет рассчитывать только суммарный поток, не предоставляя никакой информации о функции распределения ионов по энергиям.

### Эмпирическая электростатическая модель

Чтобы исследовать, как модулированный потенциал влияет на взаимодействие ионного потока с непроводящей поверхностью и получить информацию о токах, которые нельзя экспериментально измерить, а также чтобы определить оптимальные для травления по энергиям и токам режимы, был проведен компьютерный расчет токов и напряжений в эквивалентной схеме системы плазма — изолирующий слой — держатель подложки, представленной на рис. 1.

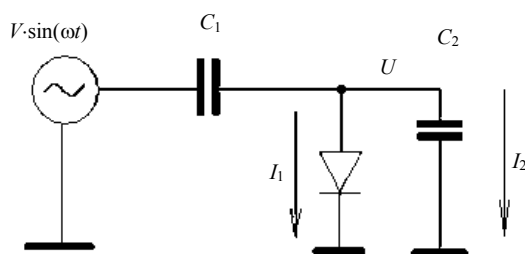


Рис. 1. Эквивалентная схема исследуемой системы

Емкость  $C_1$  образована непроводящей средой между держателем подложки, к которому подводится переменное напряжение, и поверхностью, обращенной в плазму. Емкость  $C_2$  образована слоем объемного заряда между невозмущенной плазмой и поверхностью образца (плазменный слой).

Диод, по которому протекает ток  $I_1$ , является условным обозначением нелинейного сопротивления слоя объемного заряда. Параметры этого диода для каждого режима берутся из экспериментально измеряемой вольт-амперной характеристики (ВАХ) плоского зонда, размеры и положение в камере которого соответствуют таковым для образца, подвергаемого травлению.

Уравнения Кирхгофа для эквивалентной схемы:

$$V \cdot \sin(\omega t) = \int_0^t \frac{(I_1 + I_2)}{C_1} dt + \int_0^t \frac{I_2}{C_2} dt,$$

$$U = \int_0^t \frac{I_2}{C_2} dt, \quad I_1 = -I_i + I_e \cdot \exp\left(\frac{eU}{kT}\right).$$

Коэффициенты  $I_i$ ,  $I_e$ ,  $T$  для каждого режима получаются из аппроксимации соответствующей ВАХ в квазистатическом режиме плоского зонда. Примеры характеристик зонда представлены на рис. 2.

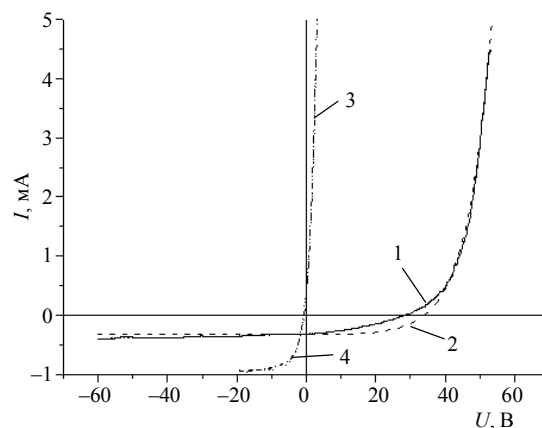


Рис. 2. Примеры ВАХ большого зонда и результаты ее экспоненциальной аппроксимации:  
1, 2 —  $H = 0$  Гс,  $U_{col} = 60$  В,  $p = 0,2$  мТорр;  
3, 4 — режим "отражательного" разряда:  
 $H = 30$  Гс,  $U_{col} = -2$  кВ,  $p = 0,6$  мТорр

Расчет дает информацию о переменных токах на изолированную поверхность и напряжениях на подложке при различных параметрах плазмы и сигнала, подаваемого с генератора на держатель подложки (рис. 3). Он позволяет также вычислить среднюю энергию ионов (с учетом экспериментально измеряемой функции распределения ионов на заземленный анализатор), оптимизировать режимы по потокам ионов и их энергиям, определить требования к техническим средствам, используемым при травлении (частота и амплитуда генератора).

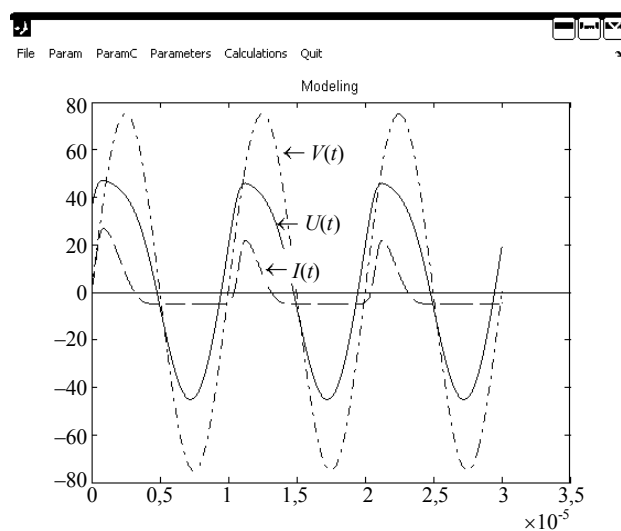


Рис. 3. Интерфейс и результат работы программы:  
 $V(t)$  — сигнал, подаваемый с генератора;  $U(t)$  — зависимость потенциала подложки от времени;  $I(t)$  — зависимость тока на подложке от времени

### Результаты расчета и сравнение с экспериментом

Для проверки результатов моделирования было проведено экспериментальное определение на-

пряжения на подложке при подаче на непроводящий зонд переменного сигнала с различными частотой и амплитудой. Эксперимент проводили на установке, описанной в работах [1, 2].

Образец — имитатор полупроводниковой структуры, представляет собой плоский конденсатор: две металлические пластины, разделенные фторопластовой пленкой. Толщина пленки подобрана так, чтобы емкость конденсатора была равна емкости типичной подложки, используемой в технологических экспериментах, с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 12$  (GaAs). Этот зонд помещали в вакуумную камеру на расстояние 10 см от оси разряда. На пластину, изолированную от плазмы, подавали переменное напряжение с амплитудой 20—200 В и частотой 50—800 кГц. С помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS1012 регистрировались и передавались на компьютер для числовой обработки входное напряжение и сигнал с обращенной к плазме поверхности зонда.

Результаты моделирования в сравнении с результатами эксперимента представлены на рис. 4, из которого видно, что при относительно низких частотах ( $\omega < \omega_{pi}$ , где  $\omega_{pi}$  — плазменная частота ионов) и небольших амплитудах сигнала результаты модельных расчетов и эксперимента практически совпадают, что свидетельствует об адекватности модели.

Отклонение модели от эксперимента становится заметно при амплитуде входного напряжения более 75 В, хотя остается незначительным до амплитуд 200 В. Отклонение объясняется тем, что модель не учитывает зависимость емкости слоя объемного заряда плазменного слоя от напряжения на нем.

При увеличении частоты отклонение модельных кривых от экспериментальных увеличивается, а при частоте 800 кГц экспериментальная кривая отличается от модельной даже качественно. Это объясняется тем, что при моделировании используется модель, параметры которой рассчитаны по квазистатической вольт-амперной характеристике, хотя известно, что на частотах, больших или близких к плазменной частоте ионов  $\omega_{pi} \sim 300$  кГц, инерция ионов искажает динамику плазменного слоя.

Описанная методика позволила выбрать технологические режимы с требуемыми энергиями ионов (в интервале 20—100 эВ) и максимальным ионным током на зонд.

Методика позволяет оптимизировать технологический режим без проведения трудоемких экспериментов.

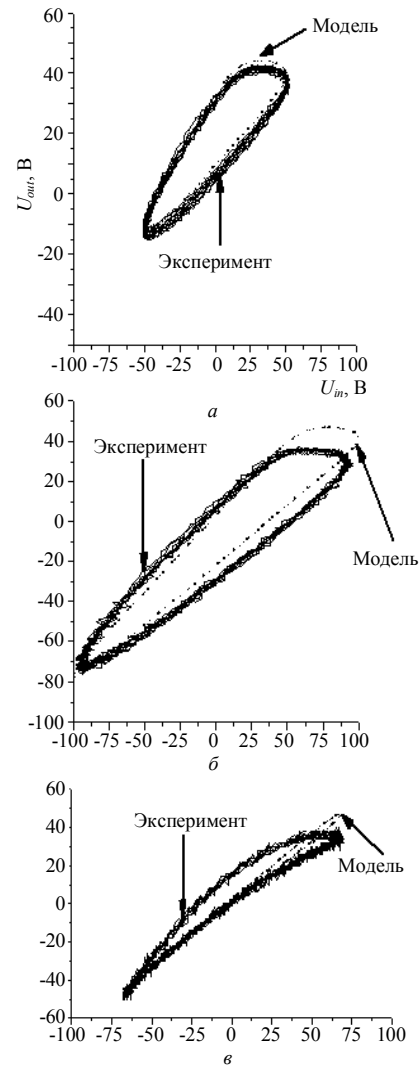


Рис. 4. Зависимости потенциала на подложке от параметров входного сигнала:  
 а —  $F=100$  кГц,  $U=50$  В; б —  $F=100$  кГц,  $U=100$  В;  
 в —  $F=800$  кГц,  $U=50$  В

### Режим отражательного разряда

Для напыления алмазоподобных пленок был предложен режим "отражательного разряда", при котором потенциал графитового коллектора равен потенциалу катода, и, таким образом, осуществляется распыление графита с коллектора ионами с энергией до 2 кэВ. Распыленные атомы и ионы углерода далее осаждаются на подложку, расположенную на периферии разряда. Для данного режима был проведен анализ с помощью описанной выше программы и экспериментально измеренной ВАХ (см. рис. 2). Результаты компьютерного расчета представлены на рис. 5, из которого видно, что из-за малой емкости кварцевой подложки образца потенциал поверхности, контактирующей с плазмой, колеблется слабо. Поэтому подобный способ раскачки потенциала поверхности является непригодным для данного рода технологических задач. В работе [3] предложен метод компенсации

заряда непроводящей поверхности путем модуляции потенциала плазмы, компьютерный расчет его описанным здесь методом — задача последующей работы.

мохимическом реакторе, таких как травление, перенапыление и т. п. на базе пучково-плазменного разряда без проведения трудоемких экспериментов.

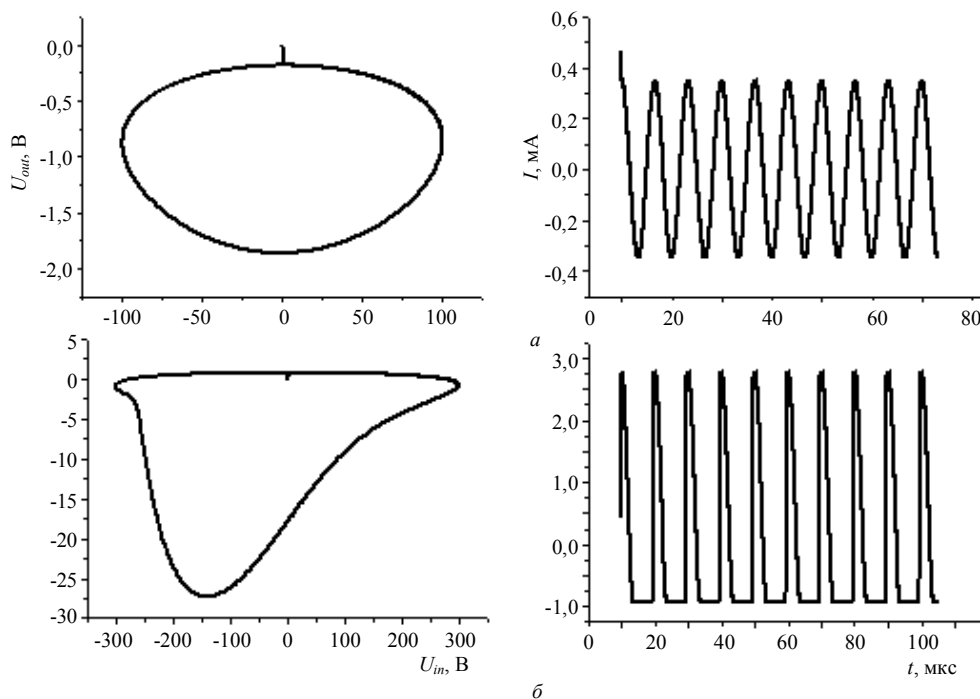


Рис. 5. Результаты компьютерного расчета для режима "отражательного" разряда: а — зависимости потенциала на подложке  $U$  от входного сигнала и тока на подложке  $I$  от времени для  $F=100$  кГц,  $U = 100$  В; б — те же зависимости для  $F = 100$  кГц,  $U = 300$  В

### Выводы

- Предложена модель, позволяющая получить информацию о токах и энергиях ионов, падающих на непроводящую поверхность в пучково-плазменном разряде.
- Проведен компьютерный расчет эмпирической модели взаимодействия ионного потока с непроводящей средой.
- Правильность и границы применимости результатов компьютерного расчета подтверждены экспериментальными данными.
- На основе результатов компьютерного расчета выбран оптимальный режим травления GaAs.
- Проведен расчет взаимодействия ионного потока с непроводящей средой для режимов напыления алмазоподобных пленок.

Результаты работы позволяют использовать уже полученные данные и методику при разработке различных технологических процессов в плаз-

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 07-08-00014).

### Литература

1. Исаев Н. В., Чмиль А. И., Шустин Е. Г. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 3. С. 257.
2. Исаев Н. В., Шустин Е. Г., Темиряева М. П., Тараканов В. П., Федоров Ю. В. // Прикладная физика. 2008. № 3. С. 73.
3. Исаев Н. В., Клыков И. Л., Шустин Е. Г.: Тез. докл. XXXVI Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС. 2009. С. 269.
4. Исаев Н. В., Клыков И. Л., Шустин Е. Г. // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 113.
5. Karkari S. K., Ellingboe A. R. // Proc. XXVIIth ICPIG. Eindhoven. The Netherlands. 2005. P. 305.

Статья поступила в редакцию 2 июля 2009 г.

## Ion flux on non-conducting surface at beam plasma discharge: calculation and experiment

*V. A. Kurnaev*

Moscow Engineering Physics Institute, 31 Kashirskoye road, 115409, Moscow, Russia

E-mail: kurnaev@plasma.mephi.ru

*V. V. Peskov, A. I. Chmil, E. G. Shustin*

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

*The computer calculation of model of plasma sheath near non-conducting surface at beam-plasma discharge at low magnetic field has been carried out. An accuracy of computer calculation results has been confirmed by experimental data. A regime for optimum etching of GaAs has been chosen based on the calculations. Also the computer calculation of model of ion flux interaction with non-conducting surface for carbon-like sputtering regimes has been performed.*

PACS: 41.75.-i; 52.25.-b

*Keywords:* ionic stream, beam plasma discharge, surface, calculation, experiment.

---

**Курнаев Валерий Александрович**, зав. кафедрой

115409, Москва, Каширское ш., 31, МИФИ

Тел. (495) 324-70-24; E-mail: kurnaev@plasma.mephi.ru

**Песков Вадим Вячеславович**, аспирант

**Чмиль Алексей Иванович**, старший науч. сотр.

**Шустин Евгений Германович**, ведущий науч. сотр.

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

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

\* \* \*