

Международный форум молодых ученых и студентов

Физико-математические науки

**ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К
МОДЕЛИРОВАНИЮ ГЕТЕРОГЕННЫХ
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕХНОЛОГИИ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

Беневоленский С.Б., Поздnev А.В.
«МАТИ» - РГТУ им. К.Э. Циолковского,
Москва

При исследовании закономерностей травления в низкотемпературной газоразрядной плазме необходимо учитывать многообразие гетерогенных массовых процессов и наличие конкурирующего травлению материала подложки процесса плазменной полимеризации [1,2].

Целью настоящей работы является моделирование влияния глубины травления, размеров окна в маскирующем покрытии, вероятности взаимодействия травящих частиц с обрабатываемой поверхностью на форму профиля травления. При этом под взаимодействием понимается как физическое распыление материала подложки, так и химические реакции между химически активными частицами плазмы и подложкой с образованием летучих соединений, приводящие к формированию углублений.

Для получения выражения, описывающего скорость бокового подтравливания нами были введены следующие допущения:

- при травлении представляет собой кнудсенновский газ;
- поток активных частиц (АЧ), ответственных за травление, по всей обрабатываемой поверхности однороден;
- скорости всех летящих частиц равны;
- рассеяние частиц со дна канавки является диффузионным;
- маска в процессе травления не разрушается;
- подтрав изначально много меньше ширины окна в маске.

Предложенная нами математическая модель описывается следующей системой уравнений:

относительная величина подтрав в точке S

$$\Delta_s = V_y \frac{1-\chi}{2p} \int_{t_s}^t \ln\left(1 + \frac{L^2}{(V_y t - H_s)^2}\right) dt,$$

максимальная величина бокового подтрав

$$h_s = V_y \frac{1-\chi}{2pL} \int_{H_s/V_y}^{H/V_y} \ln\left(1 + \frac{L^2}{(V_y t - H_s)^2}\right) dt,$$

где V_y - скорость травления арсенида галлия в нормальном направлении; χ - коэффициент взаимодействия АЧ с поверхностью; L - ширина окна в маске; H - глубина травления; H_s - глубина травления до точки S.

С использованием разработанной математической модели были получены результаты, позволяющие оценить влияние глубины травления, размеров

окна в маскирующем покрытии, вероятности взаимодействия травящих частиц с обрабатываемой поверхностью на форму профиля травления. Полученные результаты расчетов по протравленным элементам топологии оценить вероятность взаимодействия травящих частиц с обрабатываемой поверхностью в используемых при проведении технологического процесса режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. Книга 3// Под ред. Фортова В. Е. – М.: Наука, 2000, 576 с.
2. Путря М.Г. Физико-технологические основы формирования трехмерных структур УБИС плазменными методами: Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. – М.: МГИЭТ(ТУ), 2002, 278 с.

**СТАТИСТИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ
МИКРОУСКОРЕНИЙ**

Седельников А. В., Бязина А.В.
Самарский государственный
аэрокосмический университет,
Самара

В работе представлены статистические исследования уровня микроускорений, возникающих на борту орбитального космического аппарата во время проведения технологических процессов. Условия, накладываемые на уровень микроускорений для успешного проведения этих процессов, называемые микрогравитационным штилем, являются достаточно жесткими. Особенно это касается квазистатической компоненты микроускорений [1].

Моделирование микроускорений на нынешнем этапе развития космического материаловедения играет, пожалуй, более важную роль, чем даже натурные испытания из-за сложности измерения микроускорений [2].

В работе выявлено, что с учетом демпфирования собственных колебаний упругих элементов изменения уровня микроускорений во времени имеет гамма-распределение, если не учитывать демпфирование, то это распределение становится нормальным. Принципиальная разница заключается в том, что некоторые космические аппараты, например, серия «Фотон» не имеют больших упругих элементов таких, как панели солнечных батарей, поэтому в этом случае нет и демпфирования колебаний.

Для моделирования уровня микроускорений с помощью фрактальной функции Вейерштрасса-Мандельброта, рассмотренного в работах [3], [4], определены статистические параметры: математическое ожидание, дисперсия, функция распределения и т.д. Результаты моделирования сравнивались с результатами натурных экспериментов на борту орбитальной станции «Мир», а также космических аппаратов серии «Фотон» и «Спот». Сделаны выводы о возможности моделирования микроускорений с помощью фрактальной функции Вейерштрасса-Мандельброта

Вейерштрасса - Мандельброта Вейерштрасса-Мандельброта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **А.А.Авраменко, А.В.Седельников** Моделирование поля остаточной микрогравитации на борту орбитального КА // Изв. вузов Авиационная техника. – 1996. – №4. – с. 22 – 25.

2. **А.В.Седельников, Е.А.Ефимова** Учет влияния упругости узла крепления упругих элементов космического аппарата на оценку уровня микроускорений внутри рабочей зоны технологического оборудования при моделировании условий для технологических процессов // Сборник статей III-й Всероссийской научной конференции **Инновации в машиностроении**. – Пенза. – 2003. – с. 115-117

3. **А.В.Седельников, А.В.Бязина** Использование фракталов в математическом моделировании // Сборник научных трудов в Самарском филиале УРАО. – вып. 2-3. – Самара. – 2002. – с. 72 – 85.

4. **А.В.Седельников, А.В.Бязина, Н.Ю.Антипов** Использование функции Вейерштрасса-Мандельброта для моделирования микроускорений на борту КА // Сборник научных трудов X Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации ЛА. – Самара. – 2002. – с. 124-128.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ЗОНЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРУИ НА ПРЕГРАДУ

Келекеев Р.В., Карпеченко А.Г.

*Омский государственный технический университет,
Омск*

Анализ физической картины течения, возникающего при взаимодействии сверхзвуковых неизобарических струй с плоскими наклонными преградами, дает основание исследовать его с помощью методов расчета отрывных течений, возникающих в следе при обтекании тел сверхзвуковым потоком, поскольку схемы сравниваемых течений аналогичны. При этом можно выделить две характерные области. В области I при постоянном давлении происходит смещение обратного потока с воздухом и слоем смешения струи за счет её эжекции. В случае воздействия струй на преграду эта область отличается тем, что распространение обратного потока не ограничено стенкой. В связи с тем, что область II характеризуется повышением статического давления от атмосферного до максимального значения, и, следовательно, значительным изменением других газодинамических параметров, она называется областью градиентного течения. При распространении обратного потока давление изменяется слабо, поэтому область I называется областью изобарического смешения.

В настоящее время теория расчета трехмерных течений, к которым относится течение, возникающее при взаимодействии струй с преградами, не доведена до конкретных программ. В связи с этим, вначале рассматривается течение в плоскости симметрии как плоское, а затем полученное решение вместе с экспериментальными данными используется для исследо-

вания течения вне плоскости симметрии.

При воздействии сверхзвуковых неизобарических струй на наклонные преграды возникает сложная ударно-волновая структура, которая определяется параметрами струи на срезе сопла: числом Маха, степенью нерасчетности, углом полураствора сопла, показателем адиабаты, газовой постоянной, температурой торможения истекающих газов, а также расположением источника струи относительно преграды: расстоянием от среза сопла до преграды и углом ее наклона к оси струи. Поскольку образующая физическая картина течения аналогична схеме течений, возникающих в следе при обтекании тел равномерным сверхзвуковым потоком, следовательно, ее можно рассматривать в рамках теории Крокко - Лиза.

В области градиентного течения возникает деформация слоя смешения струи, при этом число Маха на внутренней границе уменьшается, а статическое давление возрастает. Образование пристеночной ударной волны происходит в результате наложения слабых волн сжатия. Для составления математической модели область градиентного течения условно разделяется на две зоны: зону течения вязкого газа (расстояние от преграды до внутренней границы слоя смешения струи) и зону невязкого сверхзвукового течения, описываемую соотношением Прандтля-Майера.

Перенос массы и импульса из невязкой в вязкую область течения описываются уравнениями сохранения, где расход газа и его количество движения определяются интегрально для всего вязкого слоя. В связи с этим, метод, применяемый для расчета взаимодействия струи с наклонной преградой, является полуэмпирическим, поскольку необходимо задать распределение газодинамических параметров поперек вязкого слоя. На основании анализа экспериментальных данных Гиневским А.С. для определения продольных профилей скорости в поперечном сечении слоя смешения предложена универсальная функция дефекта скорости. Использование данной функции, с учетом обоснованного допущения о постоянстве температуры торможения в вязком слое, позволяет описать распределение в нем всех газодинамических параметров. Кроме того, математическая модель содержит также уравнение Рейнольдса на стенке, которое учитывает трение газа по поверхности и градиент статического давления вдоль вязкого слоя.

Расчет по разработанной системе интегродифференциальных уравнений показывает удовлетворительное (до 10 %) согласование с результатами выполненных и заимствованных экспериментальных исследований. Кроме того, данная методика отличается достаточным быстродействием: время счета одного варианта не превышает 40 секунд.

РАВНОВЕСИЕ НЭША-ДЖОФФИОНА В КОАЛИЦИОННОЙ ИГРЕ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Уварова О.Н.

Одной из существенных черт научно-технического прогресса является математизация со-