**МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА**

**В.М. Лелевкин**

*Кыргызско-Российский Славянский университет, Кыргызыстан,*

*720000, г. Бишкек, ул. Киевская 44. aral@krsu.edu.kg*

Проводится расчет характеристик микроволнового разряда при атмосферном давлении на основе МГД уравнений в рамках равновесной и двух температурной моделей плазмы и сравнение результатов с экспериментом. Рассматриваются некоторые особенности горения микроволнового разряда в зависимости от геометрии, подводимой мощности электромагнитного поля и расхода газа.

В работах [1-6] разработаны теоретические модели для описания нагрева газа в микроволновых разрядах и в СВЧ плазмотронах. В данном сообщении на основе численного анализа рассматриваются некоторые особенности горения микроволновых разрядов в зависимости от геометрии плазмотрона, подводимой мощности электромагнитного поля и расхода газа.

**Равновесная МГД** м**одель плазмы.** Несмотря на различия в конструкциях СВЧ плазмотронов, способов подвода электромагнитного поля и расхода газа [1-4] равновесная МГД модель плазмы при атмосферном давлении является хорошим приближением для описания газодинамических и электромагнитных характеристик в микроволновых разрядах [3-6]:

,

,  ,

, , , .

Как следует из результатов расчета (рис.1,2), в микроволновых разрядах можно условно выделить две характерные области:

1. Высокотемпературное, токопроводящее (*σ* ≠ 0) ядро плазмы (0 ≤ *r* ≤ *Rк*), внутри которого концентрация электронов выше критической (*ne* > *nec*), идет мощная диссипация энергии электромагнитной волны и её затухание на расстоянии толщины скин-слоя;

2. Низкотемпературный, бестоковый (*σ* = 0) факел или «шуба» [6] (*r* > *Rк*), где распространяется поверхностная электромагнитная волна и нет «джоулева тепловыделения».

Ядро плазмы является как бы вторым внутренним «плазменным» электродом в коаксиальном плазмотроне, которое способствует нагреву газа, формированию и распространению поверхностной «стоячей» электромагнитной волны (рис.1,2). Поскольку концентрация электронов в ядре разряда выше критической, то электромагнитная волна, подводимая в канал плазмотрона, не проникает в приосевую область, а отражается от ядра и распространяется вдоль его границы (*r*=*Rк: ne*≈*nec*) в виде поверхностной электромагнитной волны (рис.2). Максимальные значения вектора Умова-Пойнтинга и радиальной составляющей напряженности электрического поля достигаются на границе ядра разряда, а внутри ядра  *r* < *Rк(z): Е* ≈ *Ez* = const(*r*); в факеле *r* > *Rк (z): Е ≈ Еr* (рис.3). Поток «холодного» газа, подводимый через внутренний электрод, оказывает динамическое давление на микроволновой разряд, образует область повышенного давления, и «крутой» передний фронт, через который протекает ~1% от подводимого расхода газа (рис.1,3). По мере движения газ нагревается, расширяется, смещает «холодные слои» к стенкам канала и способствует образованию «конической» геометрии ядра вблизи переднего фронта. Это приводит к защите стенок от теплового воздействия плазмы и стабилизации режима горения микроволнового разряда [6]. Роль электромагнитных сил в ускорении плазмы заметна на переднем фронте ядра микроволнового разряда.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| fig2b | | | | fig5a |
| **Рис. 1.** Линии тока газа (шаг 0.2;  = 5 л/мин), температура (шаг 1000 К) и поле изобар (*p(r,z )* = 3300, 2100 Пa) при горении микроволнового разряда в коаксиальном канале | **Рис. 2.** Напряженность электрического поля, вектор Умова-Пойнтинга (= 95 кВ/см, = 55 кВт/см2), ядро микроволнового разряда (пунктир) | | | |
| fig4a | |  | fig4b | |
| **Рис. 3.** Изменения характеристик на оси переднем фронте (a) и в сечении *z* =0 (b): давление (точки), скорость, температура, напряженность электрического поля, «джоулево тепловыделение» (пунктир), (=4813 (а), 315 (b) Па, =197 (а, b) м/с, =9148 (а), 9016 (b) К, =61 (а), 20 (b) кВ/см, =16769 (а), 196 (b) кВт/см3) | | | | |

Из-за уменьшения радиальных размеров ядра в направлении переднего фронта микроволнового разряда (рис.1,2), при распространении электромагнитной волны, возрастает плотность потока энергии и возникают большие электрические поля (*r* = 0: *E = Ez= 61 кВ/см*, *r ~0,02 мм: Emax ~95 кВ/см*)(рис.3,4). Происходит естественная «фокусировка» электромагнитного излучения и выделяется большое количество тепла (*Qjmax* ~16770 кВт/см3), которое приводит к вытягиванию микроволнового разряда навстречу потока газа, основному нагреву ядра и интенсивной ионизации газа (рис.1,3). С удалением от переднего фронта разряда быстро уменьшаются напряженность электрического поля и «джоулево тепловыделение» (рис.4).

|  |  |
| --- | --- |
| fig6a | fig6b |
| **Рис. 4.**  Распределение модуля напряженности электрического поля вблизи переднего температурного фронта и вдоль границы ядра микроволнового разряда | |

С увеличением температуры потока газа или уменьшения подводимой мощности электромагнитного излучения передний фронт микроволнового разряда становится ″прозрачным″ для натекающего на него газа и смещается вниз по потоку.

**Двух температурная МГД** м**одель плазмы.** Из сравнения результатов расчета и эксперимента (рис.5) видно, что равновесная МГД модель занижает температуру плазмы в микроволновом разряде относительно температуры электронов и завышает её относительно температуры тяжелых частиц [6]. Особенно заметно это проявляется при давлениях ниже атмосферного и при горении разряда в инертных газах.

Хорошее согласие с опытными данными дает МГД модель, в рамках двух температурного приближения плазмы [3-6]:

,

.

, ,

,

, , , .,

, , , - скорости электронов, дрейфа, амбиполярной диффузии, термодиффузии;  - скорость рождения и гибели электронов в процессах ионизации и рекомбинации*.*

Плазма неравновесна в ядре микроволнового разряда, отличие температур электронов и тяжелых частиц достигают ~5÷10 кК. С увеличением подводимой мощности электромагнитного поля отрыв температур  от *Th* уменьшается на оси и возрастает на границе ядра. Реализуется подобие кольцевой области ″горячих″ электронов, экранирующих проникновение электромагнитного излучения в приосевую область разряда. Неравновесность плазмы качественно изменяет газодинамическую картину течения: от режима «обтекания» переднего фронта равновесного микроволнового разряда наблюдается режим ″протекания″ газа через неравновесный разряд [2-6]. Количество газа протекающего через разряд, возрастает с увеличением температурной неравновесности плазмы. В зависимости от подводимой мощности электромагнитного излучения наблюдаются 3 режима горения микроволнового разряда (рис.6):

1. **Диффузный (**неустойчивый): плазма ″прозрачна″ для электромагнитного поля, малая диссипация мощности электромагнитного поля, размеры скин-слоя больше радиуса ядра разряда, относительно низкие температуры (нижняя ветвь *T*0–*Qп*) и большие значения напряженности электрического поля (верхняя ветвь *E*0-*Qп*);

2. **Переходной:** микроволновой разряд горит с определенного минимального значения подводимой мощности электромагнитного поля (*Qп* ≥ *Qmin* ~ 50 Вт/см), размеры скин-слоя соизмеримы с радиусом ядра разряда;

3. **Контрагированный** (устойчивый): температура (верхняя ветвь *T*0-*Qп*) с увеличением *Qп* асимптотически стремится к максимальному значению 5÷6 кК, напряженность электрического поля и «джоулево тепловыделение» минимальны на оси и возрастают к границе ядра разряда (нижняя ветвь *E*0-*Qп*), размеры скин-слоя меньше размеров разряда.

|  |  |
| --- | --- |
| fig1 | 001-1 |
| **Рис. 5.** Изменение температуры в микроволновом разряде аргона: температура электронов *Te*, тяжелых частиц *Th,* равновесная температура *Т = Т*LTE (пунктир),  точки – эксп. данные [6] (*Te* = 11837 K) | **Рис. 6**. **Х**арактеристики микроволнового разряда радиального типа, горящего в воздухе. Режимы горения: A - диффузный; B - переходной;C- контрагированный |

Подобный характер горения микроволнового разряда наблюдается в СВЧ плазмотронах радиального типа, на волне Н10 и на основе круглых волноводов [3].

**Литература.**

**1. Г.В.Лысов.** *Моделирование и методы расчета физико-химических процессов в низкотемпературной плазме*. М.: Наука, 1974. - с. 247-270.

**2. Ю.П**.**Райзер.** *Физика газового разряда*. М.: Наука, (1987), 592 с.

**3. С.В.Дресвин, А.А.Бобров, В.М. Лелевкин** и др. *ВЧ-СВЧ плазмотроны*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, (1992). – 319 с.

**4. V.M.Lelevkin, D.K.Otorbaev, D.C**. **Sehram.** *Phisics of non-equilibrium plasmas. North-Holland.* – Amsterdam (Netherlands), 1992. – 412 p.

**5. Э.Б.Кулумбаев, В.М.Лелевкин, В.Ф.Семенов.** *Энциклопедия низкотемпературной плазмы.* Х1-5. М., Янус-К. (2006).- с.437-501.

6. **С.М. Грицинин, А.М.Давыдов, И.А. Коссый, Э.Б.Кулумбаев, В.М.Лелевкин.** *Физика плазмы*, (2013). **39**, № 7, с. 655-667.