

Влияние отрицательных ионов на плазменно-пылевую структуру

Зобнин А.В., Усачёв А. Д., Липаев А.М., Петров О.Ф., Фортвов В. Е.

ОИВТ РАН, Москва,

Пустыльник М.Ю., Thomas H.M.

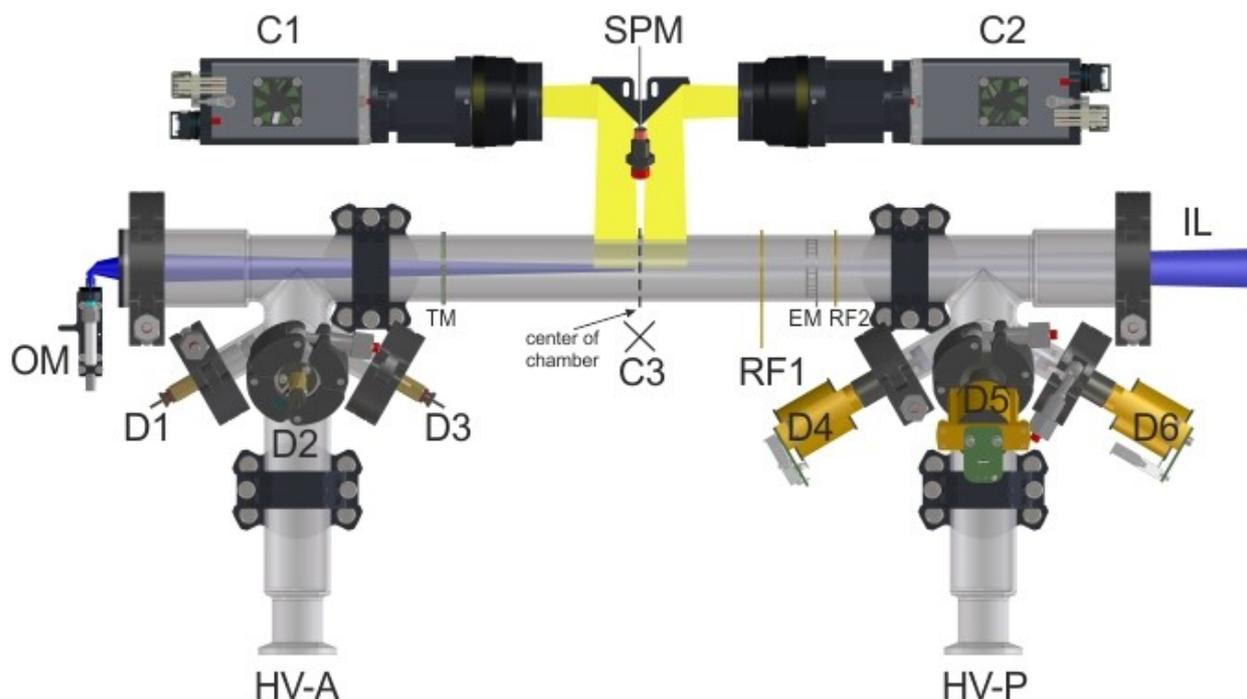
IMPS DLR, Köln, Germany,

Thoma M.H.

JLU, Geissen, Germany

Экспериментальные наблюдения

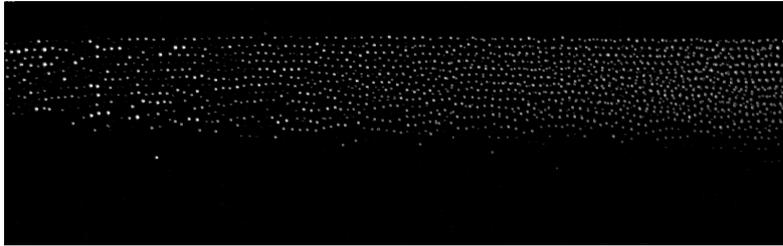
Разрядная камера установки «Плазменный Кристалл -4»



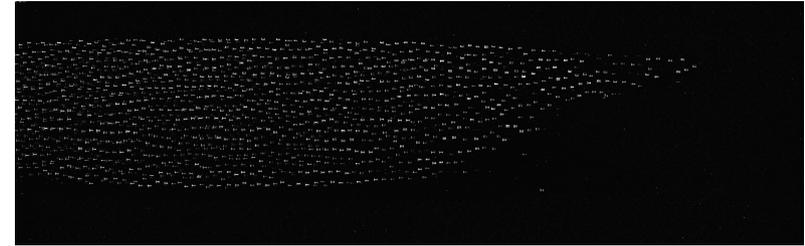
C1 и C2 – видеокамеры высокого разрешения, C3 – видеокамера для наблюдения за свечением плазмы, SPM – оптоволоконный ввод спектрометра, OM – оптоволоконный вывод мощного лазера, D1 – D3 – 3 пневматических инжектора пылевых частиц, D5 – D6 – 3 механических инжектора пылевых частиц, TM – локальный нагреватель трубки (термический манипулятор), RF1 – подвижный высокочастотный индуктор, RF2 – неподвижный высокочастотный индуктор, EM – манипуляционный электрод, IL – лазерный световой нож, HV-P – заземленный электрод, HV-A – активный высоковольтный электрод

Экспериментальные наблюдения

12.10.2016 (миссия 3) , частицы 3.38μ , рабочий газ - неон

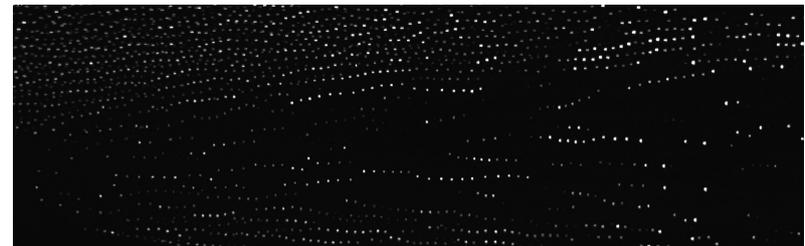
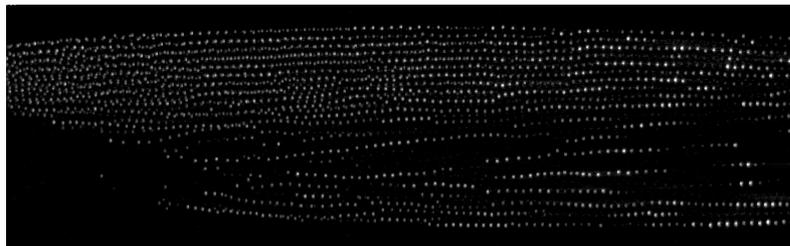


60 Па,



100 Па 1 мА (100 Гц, скважность 0.72)

15.02.2017 (миссия 4)

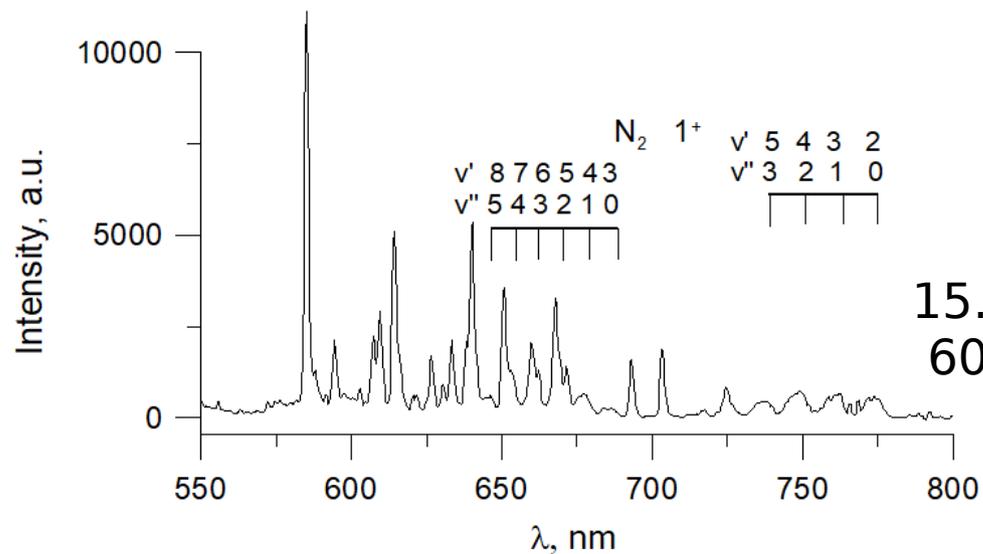
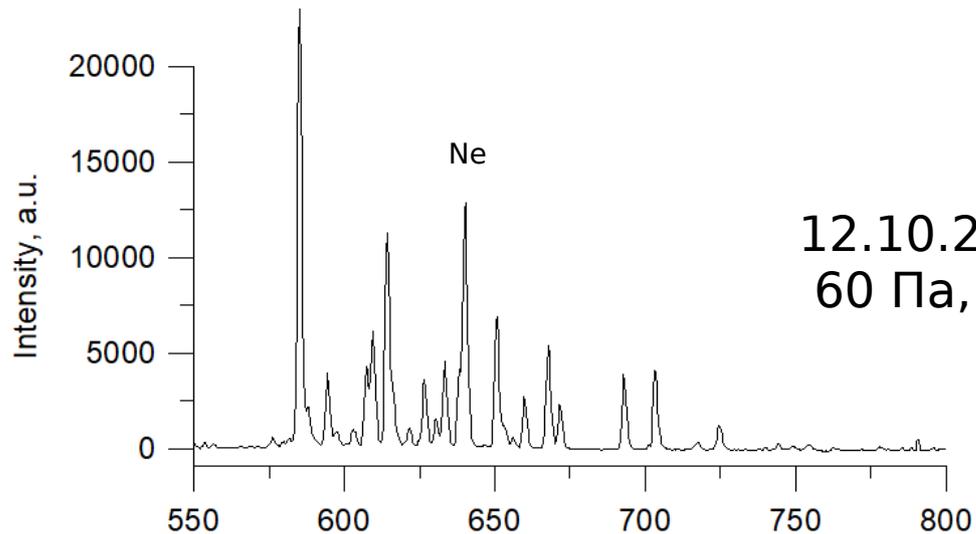


Теже параметры разряда, что и в миссии 3

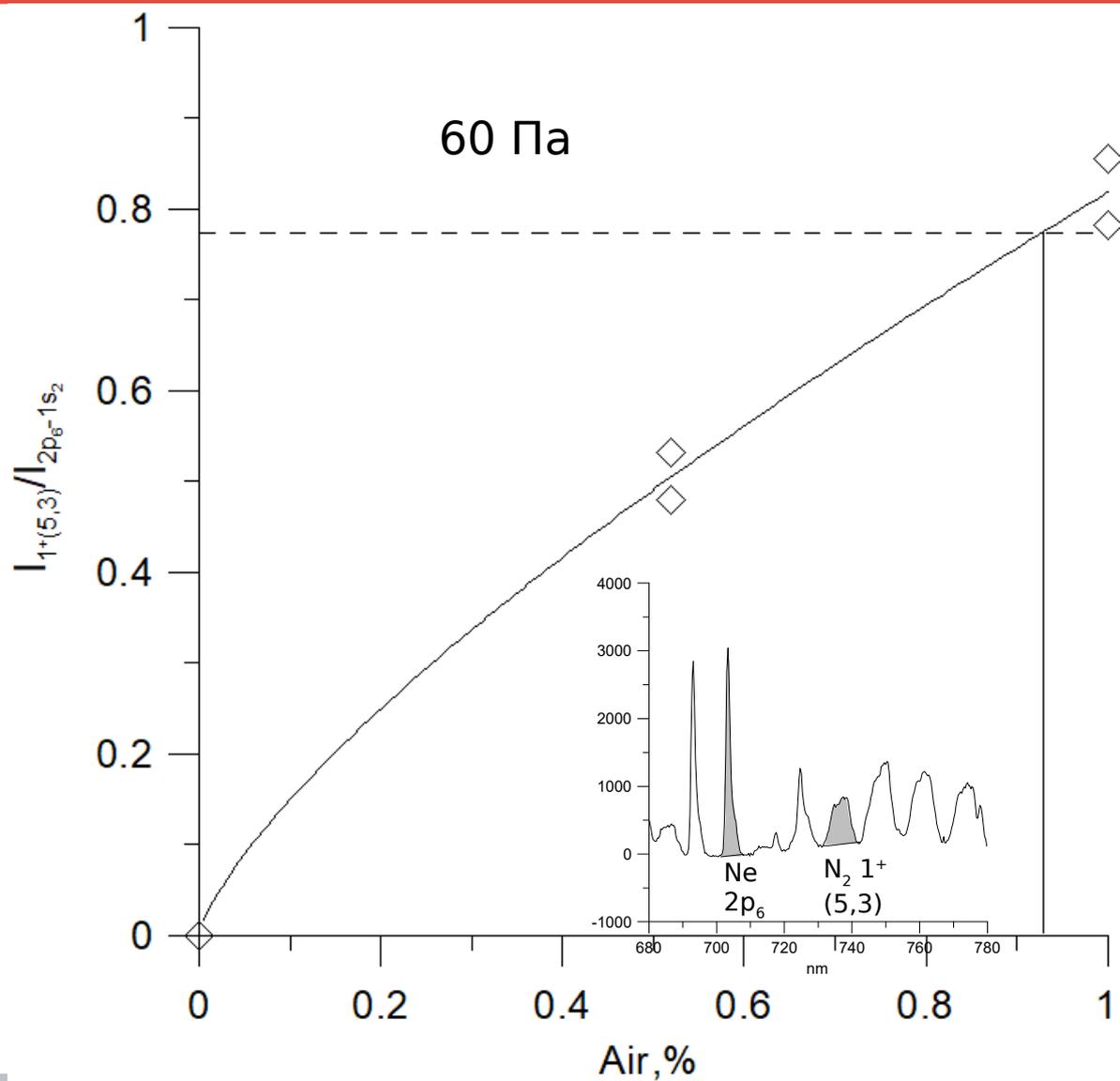
В чём причина различия?

Экспериментальные наблюдения

При проведении миссии 4 возникла необходимость снизить давление газа на входе в систему напуска, для этого шланг подачи газа был отсоединён от баллона и частично откачан. В процессе отсоединения шланга в него попало некоторое количество воздуха, что проявилось в появлении линий азота в спектрах свечения плазмы



Определение концентрации воздуха с помощью калибровочного эксперимента



Разряд постоянного тока с примесью кислорода

Параметры, принятые в модели:

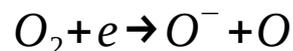
Давление 60 Па, ток разряда 1 мА, $[O_2]=0.18\%$.

Концентрация электронов на оси трубки $n_0=3\times 10^{14} \text{ м}^{-3}$,

Поле разряда $E_z= 250 \text{ В/м}$,

Температура электронов $T_e= 6 \text{ эВ}$.

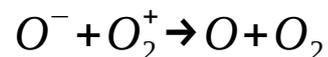
Основная реакция образования отрицательных ионов



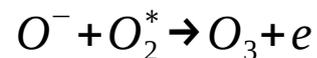
Ион O^- является доминирующим отрицательным ионом.

Доминирующим положительным ионом является O_2^+ с минимальной энергией ионизации.

Гибель отрицательных ионов происходит в реакциях рекомбинации



и отрыва электрона при взаимодействии с синглетным кислородом



Концентрация синглетного кислорода определяется балансом реакций возбуждения молекулы кислорода в основном состоянии при электронном ударе, тушения синглетного состояния электронами и диссоциации при электронном ударе. Поскольку коэффициент тушения на стенках для состояния $a^1\Delta_g$ аномально мал, то концентрация синглетного кислорода не зависит от радиуса.

Расчётная концентрация синглетного кислорода составляет 21% от общего количества кислорода.

Разряд постоянного тока с примесью кислорода

При моделировании распределения и динамики заряженных частиц предполагается распределение электронов в радиальном поле по Больцману, что даёт уравнение

$$E_r = -T_e \frac{\nabla n_e}{n_e}$$

Условия непрерывности потоков положительных и отрицательных ионов дают уравнения

$$\begin{aligned} -\nabla D_+ \left(\nabla n_{i+} + \frac{\tau n_{i+} \nabla(n_e)}{n_e} \right) &= \nu_i n_e - K_r n_{i+} n_{i-} - K_d n_d n_e \\ -\nabla D_- \left(\nabla n_{i-} - \frac{\tau n_{i-} \nabla(n_e)}{n_e} \right) &= \nu_a n_e - \nu_d n_{i-} - K_r n_{i+} n_{i-} \end{aligned}$$

Где D_+ и D_- - коэффициенты диффузии положительных и отрицательных ионов в неоне, $\tau = T_e / T$,

ν_i — частота ионизации (параметр, подбираемый для обеспечения граничных условий),

ν_a — частота диссоциативного прилипания, ν_d — частота отрыва электронов в реакции с синглетным кислородом, K_r — константа скорости рекомбинации ионов, K_r — константа скорости рекомбинации электронов и ионов на пылевых частицах.

Условие квазинейтральности имеет вид

$$n_{i+} = n_e + n_{i-} + z_d n_d$$

Разряд постоянного тока с примесью кислорода

Заряд пылевых частиц определяется балансом электронов и положительных ионов. Поток электронов $K_d n_0 = n_0 r_p^2 (8\pi e T_e / m_e)^{0.5} \exp(\varphi_s / T_e) (1 - R_e)$, где $\varphi_s = -9 \cdot 10^9 e z_d / r_p$ – потенциал поверхности частицы, r_p – радиус частицы, R_e – коэффициент отражения электронов от поверхности частицы. Коэффициент отражения электронов принят равным 60%, в соответствие с результатами численного моделирования разряда постоянного тока с пылевой структурой в чистом неоне (Zobnin, A. V., Usachev, A. D., Petrov, O. F., Fortov, V. E., Thoma, M. H. & Fink, M. A. 2018 *Physics of Plasmas* 25, 033702). Поток ионов рассчитывался по формуле (Khrapak, A. S., Morfill, G. E. 2008 *Physics of Plasmas* 15, 114503)

$$I_i = (I_h^{-1} + I_k^{-1})^{-1}$$

где I_h — поток ионов в гидродинамическом приближении $I_h = -4\pi n_+ e \varphi_s r_p (v_c m_i)$, а I_k — ионный ток в слабостолкновительном режиме $I_k = I_{OML} + (4\pi/3) n_+ R_c^3 v_c$ где I_{OML} - ионный ток в приближении ограниченного орбитального движения, $R_c = \lambda_D \ln(1 - \varphi_s r_p / (T \lambda_D))$ — радиус захвата ионов, λ_D — радиус Дебая, а v_c — частота столкновений положительных ионов с нейтралами.

Сила, действующая на пылевую частицу, является суммой электрической силы, силы ионного увлечения и термофоретической силы. Для приближённого учёта силы ионного увлечения примем, что сумма электрической силы и силы ионного увлечения пропорциональна электрическому полю и соответствует эффективному заряду частицы Z_{eff} , причём эффективный заряд определяется экспериментально по скоростям дрейфа частиц и меняется от 1500 на оси трубки до 1800 на краю облака.

Разряд постоянного тока с примесью кислорода

Термофоретическая сила пропорциональна плотности потока тепла $F_{th} = \sigma W$, где $\sigma = 1.337 * r_p^2 (m_g / (eT))^{0.5}$. Баланс сил, действующих на пылевую частицу записывается как

$$\sigma W = -eT_e z_{eff} \nabla (n_e) / n_e$$

Тепло выделяется вследствие дрейфа ионов в поле разряда и в процессах рекомбинации положительных и отрицательных ионов и положительных ионов с электронами на поверхности пылевых частиц.

$$-\nabla W = e \frac{E_z^2}{T} (D_- n_{i-} + D_+ n_{i+}) + K_r n_{i+} n_{i-} U_1 + K_d n_d n_e U_2$$

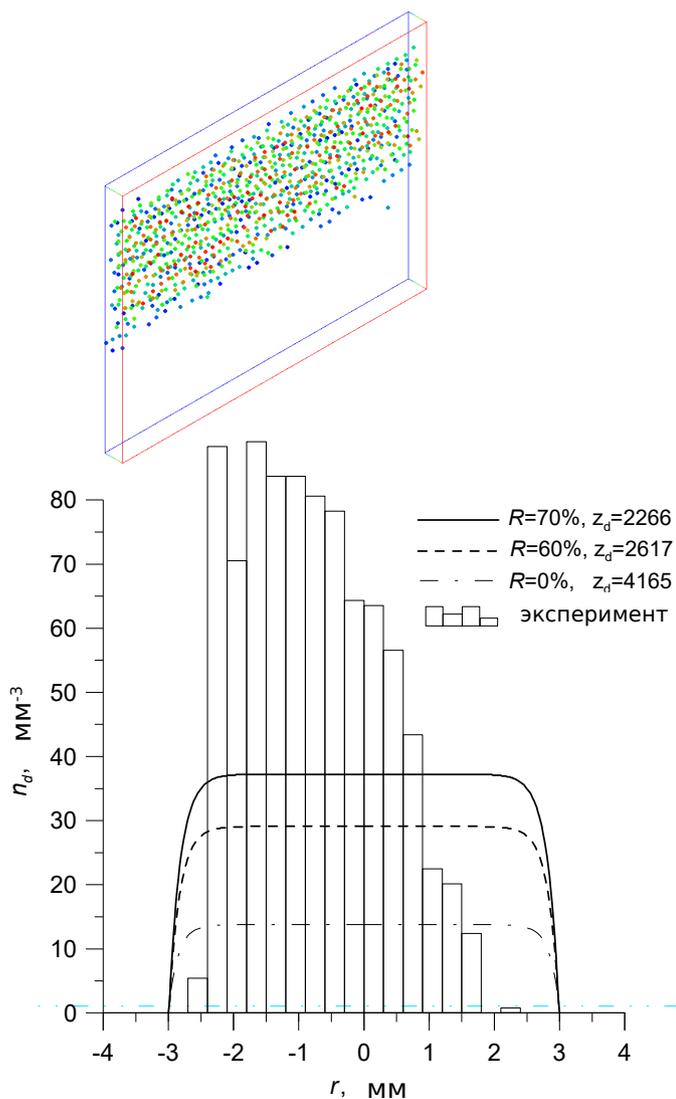
$$U_1 = 8.4 \text{ эВ}, U_2 = 12.6 \text{ эВ} + \varphi_s + T_e$$

Граничные условия на оси трубки градиенты концентраций равны 0, поток тепла равен 0, концентрация электронов задана, концентрация пылевых частиц подбирается такой, чтобы на границе облака концентрация пыли уходила на 0, концентрация отрицательных ионов подбирается такой, чтобы на стенке разрядной трубки поток отрицательных ионов обращался в 0. На границе облака все потоки непрерывны, частота ионизации подбирается так, чтобы на стенке трубки концентрация электронов стремилась к 0.

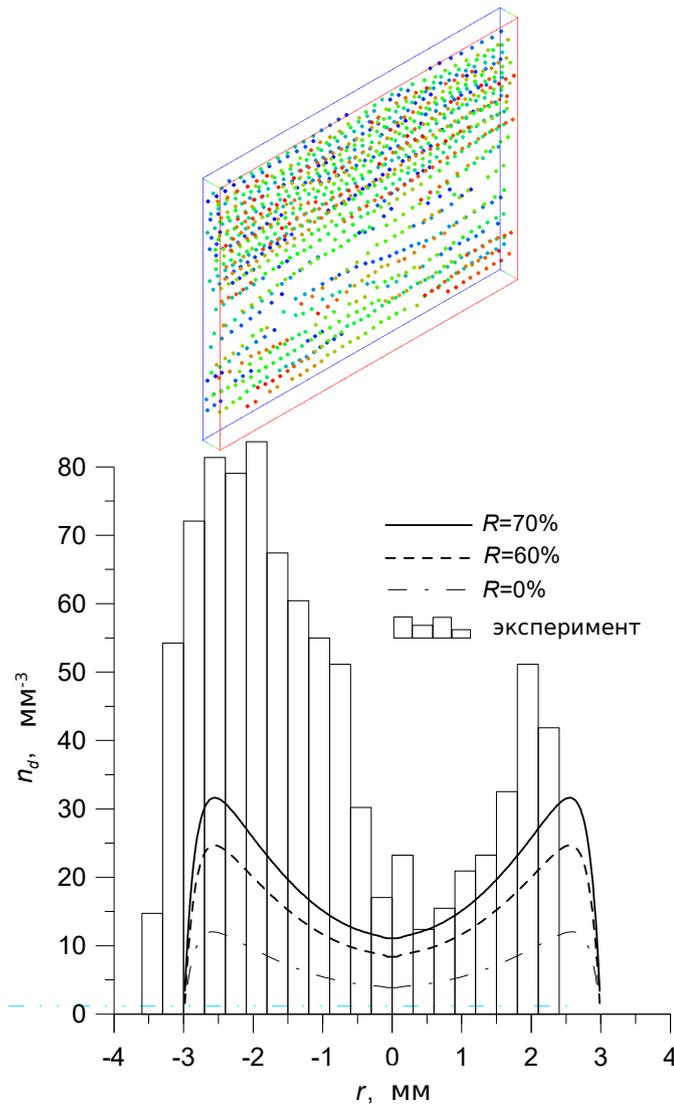
Результаты расчётов

Пространственные распределения концентрации пылевых частиц

Разряд в чистом неоне

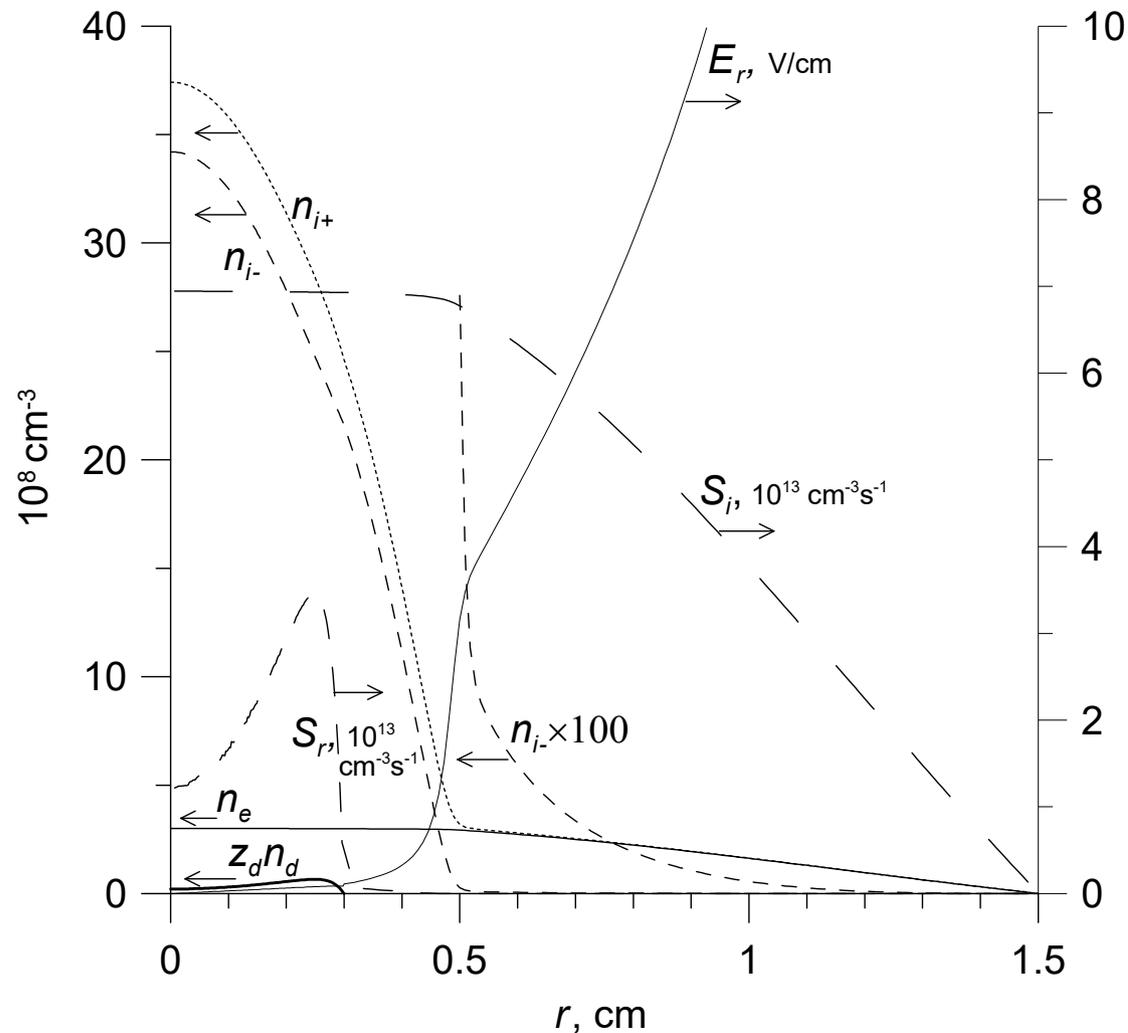


Разряд, содержащий кислород



Результаты расчётов

Расчётные радиальные распределения концентраций электронов, положительных и отрицательных ионов, пространственного заряда пылевой компоненты, скоростей ионизации и рекомбинации, а также напряжённости радиального поля



Выводы по результатам расчётов

- В слаботочном разряде при 60 Па отрицательные ионы собираются вблизи оси разряда, где их концентрация на порядок превышает концентрацию электронов.
- Этот поток способен оказывать существенное воздействие на пылевую структуру.
- Снижение концентрации пылевых частиц при наличии потока отрицательных ионов обусловлено увеличением нагрева газа и снижением поля амбиполярной диффузии.

Распределение потенциалов вокруг заряженной поглощающей частицы в плазме с отрицательными ионами во внешнем поле в гидродинамическом приближении

Уравнения непрерывности потоков

Для положительных ионов

$$(\nabla, (n_+ (\mathbf{E} - \nabla \varphi))) - T \Delta n_+ = -(F/b_+) \delta(\mathbf{r})$$

Для электронов

$$-(\nabla, (n_e (\mathbf{E} - \nabla \varphi))) - T_e \Delta n_e = -(F/b_e) \delta(\mathbf{r})$$

Для отрицательных ионов

$$-(\nabla, (n_- (\mathbf{E} - \nabla \varphi))) - T \Delta n_- = 0$$

\mathbf{E} - внешнее поле

φ - потенциал, обусловленный наличием частицы, спадающий на бесконечности

F - поток ионов на частицу

b_+ - подвижность положительных ионов

Распределение потенциалов вокруг заряженной поглощающей частицы в плазме с отрицательными ионами во внешнем поле в гидродинамическом приближении

Линеаризованные уравнения

$$\hat{n}_+ = n_+ - n_{+0} \quad \hat{n}_- = n_- - n_{-0} \quad \hat{n}_e = n_e - n_{e0}$$

$$i(\mathbf{k}, \mathbf{E}) \hat{n}_+ + k^2 n_{+0} \varphi + k^2 T \hat{n}_+ = -(F/b_+) / (2\pi)^{3/2}$$

$$-i(\mathbf{k}, \mathbf{E}) \hat{n}_e - k^2 n_{e0} \varphi + k^2 T_e \hat{n}_e = -(F/b_e) / (2\pi)^{3/2}$$

$$-i(\mathbf{k}, \mathbf{E}) \hat{n}_- - k^2 \varphi n_{-0} + k^2 T \hat{n}_- = 0$$

$$k^2 \varepsilon_0 \varphi = e(\hat{n}_+ - \hat{n}_- - \hat{n}_e - z_d / (2\pi)^{3/2})$$

Z_d - заряд частицы

Условие квазинейтральности для фоновой плазмы

$$n_{+0} = n_{e0} + n_{-0}$$

Распределение потенциалов вокруг заряженной поглощающей частицы в плазме с отрицательными ионами во внешнем поле в гидродинамическом приближении

Уравнение для потенциала

$$\varphi(\mathbf{k}) = \frac{-ez_d - eJ(\chi_+ - \chi_e n_{+0} b_+ / (b_e n_{e0}))}{(2\pi)^{3/2} \varepsilon_0 \mathbf{k}^2 (1 + \chi_+ + \chi_- + \chi_e)}$$

$$\chi_+ = k_{D+}^2 / (\mathbf{k}^2 + i(\mathbf{k} \mathbf{k}_E)) \quad \mathbf{k}_E = \mathbf{E}/T = \mathbf{u}/(v_t l) \quad \text{- нормированное поле}$$

$$\chi_- = k_{D-}^2 / (\mathbf{k}^2 - i(\mathbf{k} \mathbf{k}_E)) \quad J = F \varepsilon_0 / (e n_{+0} b_+) \quad \text{- нормированный (безразмерный) поток плазмы на частицу}$$

$$\chi_e = k_{De}^2 / (\mathbf{k}^2 - i(\mathbf{k} \mathbf{k}_E) / \tau) \quad \tau = T_e / T \quad \text{- отношение температур электронов и ионов}$$

$$k_{D+}^2 = \frac{n_{+0} e}{\varepsilon_0 T} \quad k_{D-}^2 = \frac{n_{-0} e}{\varepsilon_0 T} \quad k_{De}^2 = \frac{n_{e0} e}{\varepsilon_0 T_e} \quad k_D^2 = k_{D+}^2 + k_{D-}^2 + k_{De}^2 = \lambda_D^{-2}$$

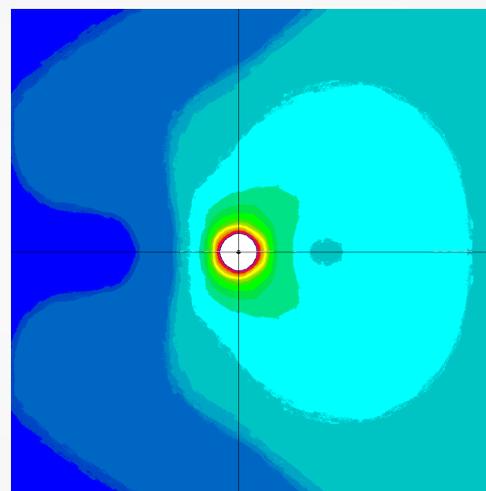
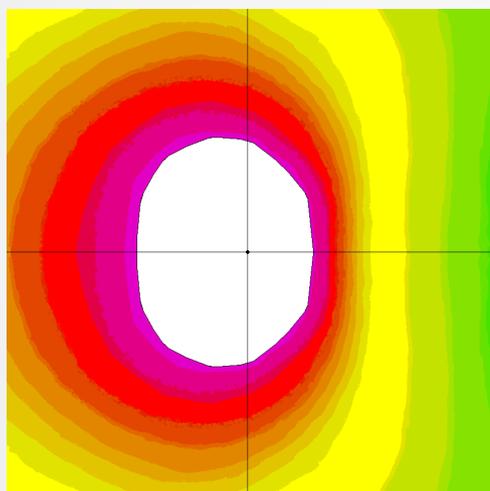
$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int \varphi(\mathbf{k}) \exp(i(\mathbf{k} \mathbf{r})) d^3 \mathbf{k}$$

Распределение потенциалов вокруг частицы (за вычетом внешнего поля)

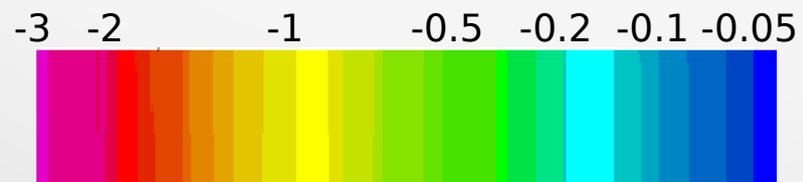
Чистый неон

Неон с примесью воздуха

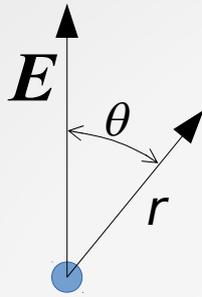
0.5мм X 0.5мм



потенциал, мВ



Асимптотическое поведение потенциала на больших расстояниях



$$\tau \rightarrow \infty \quad r \gg \lambda_D, k_E \lambda_D^2 / \eta$$

$$\xi = n_{-0} / n_{e0}$$

$$\eta = n_{e0} / (n_{+0} + n_{-0}) = (1 + 2\xi)^{-1}$$

$$\varphi = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \left(-\frac{A}{r} + B \frac{k_E \cos\theta}{r^2 k_D^2} + \frac{\exp\left(-\eta k_E r \cos^2 \frac{\theta}{2}\right)}{r} \left(C - \frac{D}{k_D^2} \left(\frac{k_E}{r} \cos\theta + \eta k_E^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) - H \frac{k_E^2}{k_D^2} \left(\frac{\sin^2 \theta}{2} - \eta k_E r \cos^4 \frac{\theta}{2} \right) \right) \right)$$

$$A = J(1 + \xi) \quad B = z_d / \eta - J(1 + \xi) / \eta \quad C = 2J\eta\xi(1 + \xi)$$

$$D = 4z_d \xi \eta (1 + \xi) - 4J\xi \eta^2 (1 + \xi) (2 + 3\xi + 2\xi^2) \quad H = 8J\xi^2 \eta^3 (1 + \xi)^2$$

Составляющая потенциала, спадающая как $\sim 1/r$

$$\varphi \approx \frac{-eJ(1 + \xi)}{4\pi\epsilon_0 r} \left(1 - 2\xi\eta \exp\left(-\eta k_E r \cos^2 \frac{\theta}{2}\right) \right)$$

Распределение потенциалов вокруг заряженной поглощающей частицы в плазме с отрицательными ионами во внешнем поле в гидродинамическом приближении

Присутствие отрицательных ионов в плазме во внешнем поле существенно изменяет взаимодействие между пылевыми частицами. Поток отрицательных ионов ведёт к усилению анизотропии потенциала вокруг заряженной поглощающей частицы в условиях гидродинамического режима обтекания, когда поток положительных ионов не может дать существенной анизотропии. В анизотропном потенциале взаимодействия появляется медленно-спадающая (как $1/r$) составляющая, что способствует формированию протяжённых цепочечных кластеров.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта в форме субсидии на проведение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 13.1902.21.0035.

Авторы выражают благодарность Роскосмосу и Европейскому Космическому Агентству за поддержку в проведении эксперимента «Плазменный Кристалл — 4» на борту МКС.

Спасибо за внимание