

# Собственные колебания ограниченной плазмы в магнитном поле

**Выполнил:**

**Студент 2-го курса**

**Физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова**

**Павлов А.И.**

**Научный руководитель:**

**Доцент С.А. Двинин**

**Кафедра Физической электроники**

# Введение

Одним из важнейших вопросов организации плазменных технологических процессов является разработка источников плазмы, обладающих свойствами, оптимальными для данной технологии, например: высокой однородностью, заданными плотностью плазмы, энергией заряженных частиц, концентрацией химически активных радикалов. Анализ показывает, что наиболее перспективными для применения в промышленных технологиях являются высокочастотные (ВЧ) источники плазмы, так как, во-первых, с их помощью можно обрабатывать как проводящие, так и диэлектрические материалы, а во-вторых, в качестве рабочих газов можно использовать не только инертные, но и химически активные газы. Сегодня известны источники плазмы, основанные на емкостном и индуктивном ВЧ-разрядах. Особенностью емкостного ВЧ-разряда, наиболее часто используемой в плазменных технологиях, является существование приэлектродных слоев объемного заряда, в которых формируется среднее по времени падение потенциала, ускоряющего ионы в направлении электрода. Это позволяет обрабатывать с помощью ускоренных ионов образцы материалов, расположенные на электродах ВЧ-емкостного разряда.

# Постановка задачи

1. Изучить типы волн, которые могут быть использованы для поддержания плазмы в магнитном поле.
2. Рассчитать дисперсию этих волн и проанализировать какие из них могут быть использованы для возбуждения плазмы разряда.
3. Используя существующие в научной группе программы расчета импеданса разряда с помощью пакета программ COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> провести предварительный расчет импеданса разряда в постоянном однородном и пространственного распределения электромагнитного поля в разряде.

# Система уравнений

Синусоидальные поля частотой  $\omega$

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t) \\ \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{r}, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} \exp(-i\omega t)$$

$$n_e = n_0 + \delta n_e \exp(-i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r})$$

$$\mathbf{V}_e = \mathbf{V}_0 \exp(-i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r})$$

Уравнения Максвелла

$$[\nabla \times \mathbf{H}] + i \frac{\omega}{c} \mathbf{E} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}(\mathbf{E}) \quad [\nabla \times \mathbf{E}] - i \frac{\omega}{c} \mathbf{H} = 0 \quad (\nabla \cdot \mathbf{H}) = 0 \quad (\nabla \cdot \mathbf{E}) = 4\pi\rho$$

Уравнения гидродинамики для электронов

$$\frac{\partial \mathbf{V}_e}{\partial t} + (\mathbf{V}_e \nabla) \mathbf{V}_e = - \frac{\gamma k T_e}{m} \frac{\nabla n_e}{n_e} - \frac{e}{m} \left\{ \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{V}_e \times (\mathbf{B}_0 + \mathbf{B})] \right\} - \nu_{en} \mathbf{V}_e$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + (\nabla \cdot n_e \mathbf{V}_e) = 0$$

# Дисперсия волн, используемых для поддержания газового разряда в магнитном поле.

Из уравнений Максвелла следует

$$[\nabla \times [\nabla \times \mathbf{E}]] - \frac{\omega^2}{c^2} \hat{\epsilon} \mathbf{E} = 0$$

$$\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}) \left[ \mathbf{k} \times [\mathbf{k} \times \mathbf{E}] \right] + \frac{\omega^2}{c^2} \hat{\epsilon} \mathbf{E} = 0$$

В векторном виде это уравнение будет

$$\begin{pmatrix} k_y^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{\perp} & k_x k_y + i \frac{\omega^2}{c^2} g & k_x k_z \\ k_x k_y - i \frac{\omega^2}{c^2} g & k_x^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{\perp} & k_y k_z \\ k_x k_z & k_y k_z & k_x^2 + k_y^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{\parallel} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0$$

$$(\hat{\epsilon}_{ij}) = \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp} & ig & 0 \\ -ig & \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\parallel} \end{pmatrix} =$$

$$\Omega_e = e\mathbf{B}/mc$$

$$\omega_{Pe}^2 = \frac{4\pi n e^2}{m}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - \frac{(\omega + iv_{en}) \omega_{Pe}^2}{\omega((\omega + iv_{en})^2 - \Omega_e^2)} & \frac{i\Omega_e \omega_{Pe}^2}{\omega((\omega + iv_{en})^2 - \Omega_e^2)} & 0 \\ \frac{-i\Omega_e \omega_{Pe}^2}{\omega((\omega + iv_{en})^2 - \Omega_e^2)} & 1 - \frac{(\omega + iv_{en}) \omega_{Pe}^2}{\omega((\omega + iv_{en})^2 - \Omega_e^2)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\omega_{Pe}^2}{\omega(\omega + iv_{en})} \end{pmatrix}$$

# Дисперсия волн, используемых для поддержания газового разряда в магнитном поле.

Уравнение четвертой степени для волновых чисел и частоты

$$\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}} h^4 - \left\{ \frac{2\omega^2 \varepsilon_{\parallel}}{c^2} - \left\{ \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}} + 1 \right\} k_{\perp}^2 \right\} h^2 + \left\{ k_{\perp}^2 - \frac{\omega^2 \varepsilon_{\parallel}}{c^2} \right\} \left\{ k_{\perp}^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \left\{ \varepsilon_{\perp} - \frac{g^2}{\varepsilon_{\perp}} \right\} \right\} = 0$$

$$k_{\perp}^4 - \left\{ \frac{\omega^2 \varepsilon_{\parallel}}{c^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \left\{ \varepsilon_{\perp} - \frac{g^2}{\varepsilon_{\perp}} \right\} - \left\{ \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}} + 1 \right\} h^2 \right\} k_{\perp}^2 + \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}} \left\{ \left\{ \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{\perp} - h^2 \right\}^2 - \frac{\omega^4}{c^4} g^2 \right\} = 0 \quad h = k_z$$

$$\frac{\omega^4}{c^4} \varepsilon_{\parallel} \left( \varepsilon_{\perp} - \frac{g^2}{\varepsilon_{\perp}} \right) - \frac{\omega^2}{c^2} \left( 2\varepsilon_{\parallel} h^2 + k_{\perp}^2 \left( \varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp} - \frac{g^2}{\varepsilon_{\perp}} \right) \right) + \left( \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}} h^4 + \left( \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}} + 1 \right) h^2 k_{\perp}^2 + k_{\perp}^4 \right) = 0$$

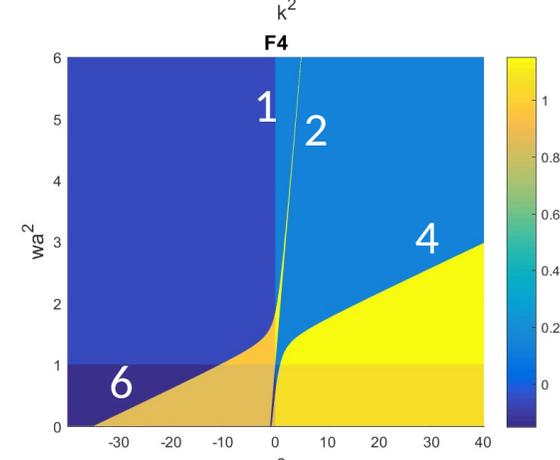
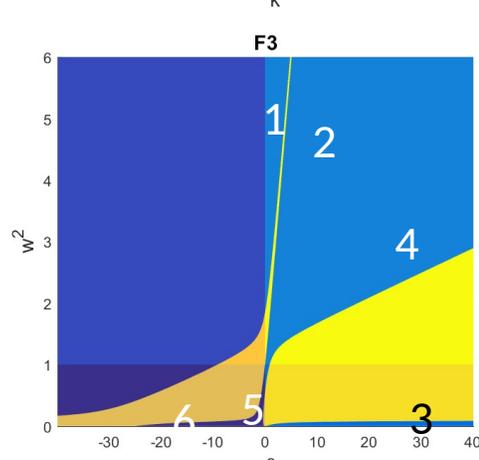
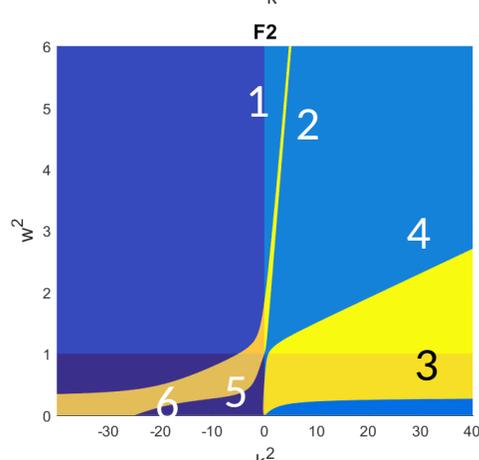
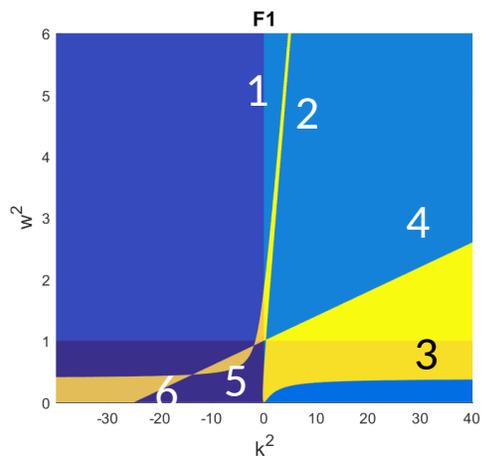
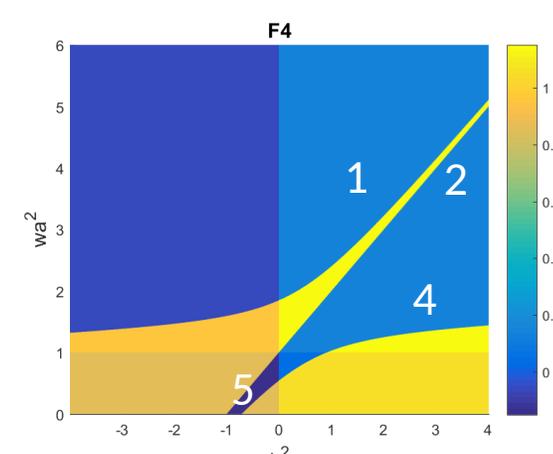
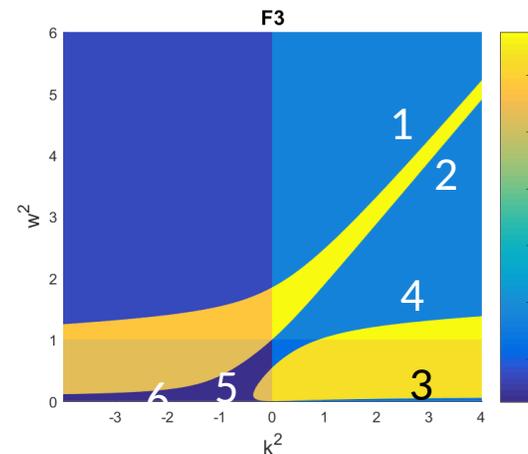
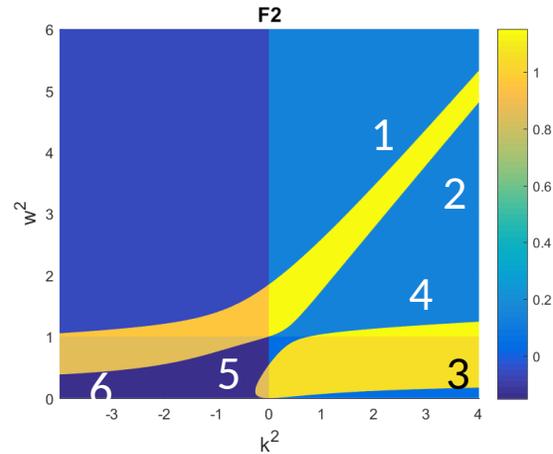
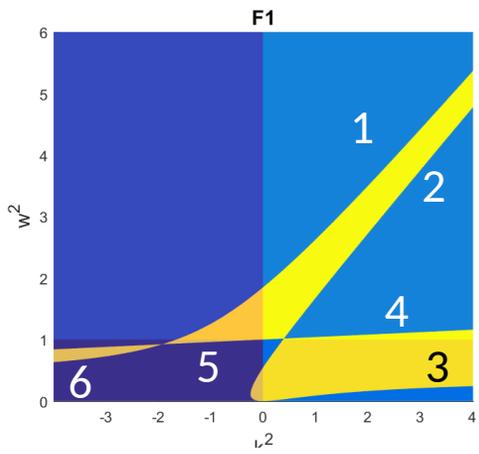
Уравнение, учитывающее давление электронов

$$\mathbf{k} = (k \sin \theta, 0, k \cos \theta)$$

$$C_S^2 = \gamma k T_e / m$$

$$\left\{ \left\{ (\omega + i\nu_{en}) - \frac{\omega \omega_{Pe}^2}{(\omega^2 - c^2 \mathbf{k}^2)} \right\} - \frac{\omega \Omega_0^2 \sin^2 \theta}{(\omega(\omega + i\nu_{en}) - \mathbf{k}^2 C_S^2 - \omega_{Pe}^2)} \right\} \left\{ (\omega + i\nu_{en}) - \frac{\omega \omega_{Pe}^2}{(\omega^2 - c^2 \mathbf{k}^2)} \right\} + \Omega_0^2 \cos^2 \theta = 0$$

Дисперсия волн в магнитном поле в зависимости от угла распространения.  $\omega_{pe}=5.6 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ ,  $\Omega_e=3.5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ ,  $V_S/c=0.2$ .



$\theta=0$

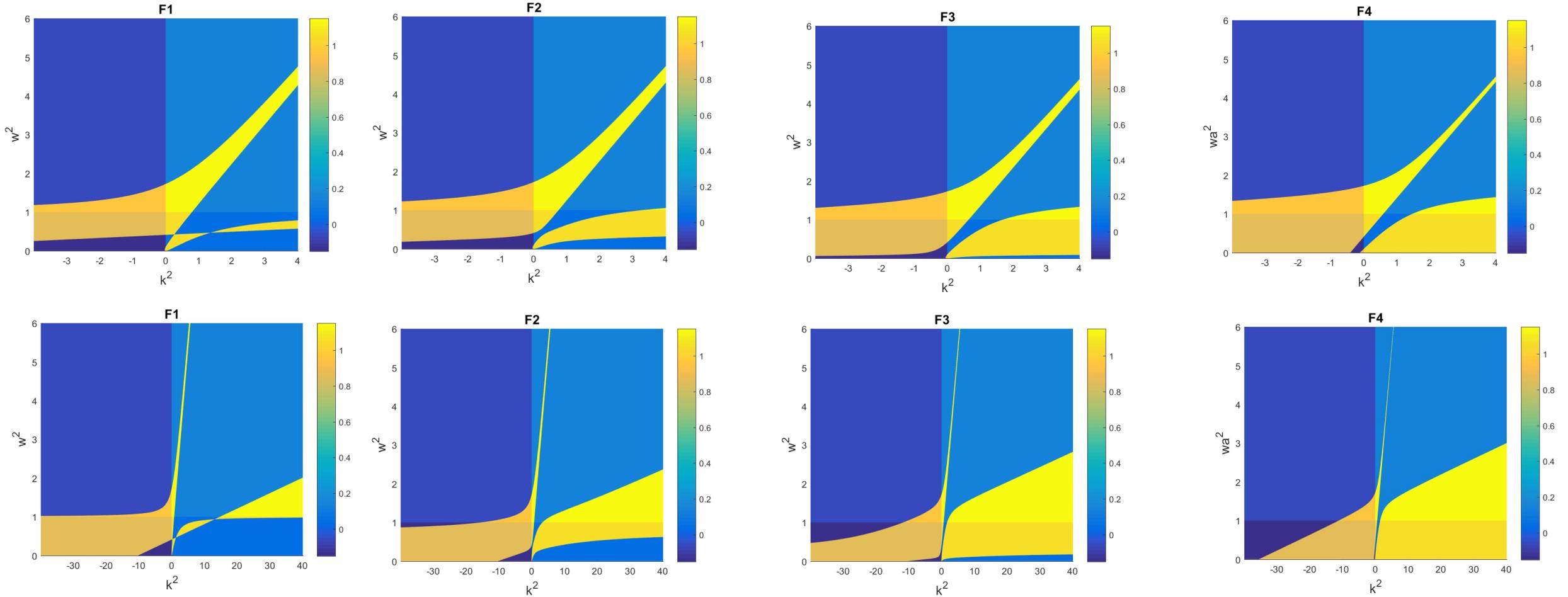
$\theta=\pi/6$

$\theta=\pi/3$

$\theta=\pi$

Циркулярно-поляризованные поперечные волны (1), (2), геликон (3), ленгмюровские (верхнегибридные) волны (4), скин-эффект (5) и Дебаевское экранирование (6). Рисунки сверху и снизу отличаются масштаб по оси  $k$ .

Дисперсия волн в магнитном поле в зависимости от угла распространения.  $\omega_{pe}=5.6 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ ,  $\Omega_e=8.8 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ ,  $V_S/c=0.2$ . Рисунки сверху и снизу отличаются масштабом по оси  $k$ .



$\theta=0$

$\theta= \pi/6$

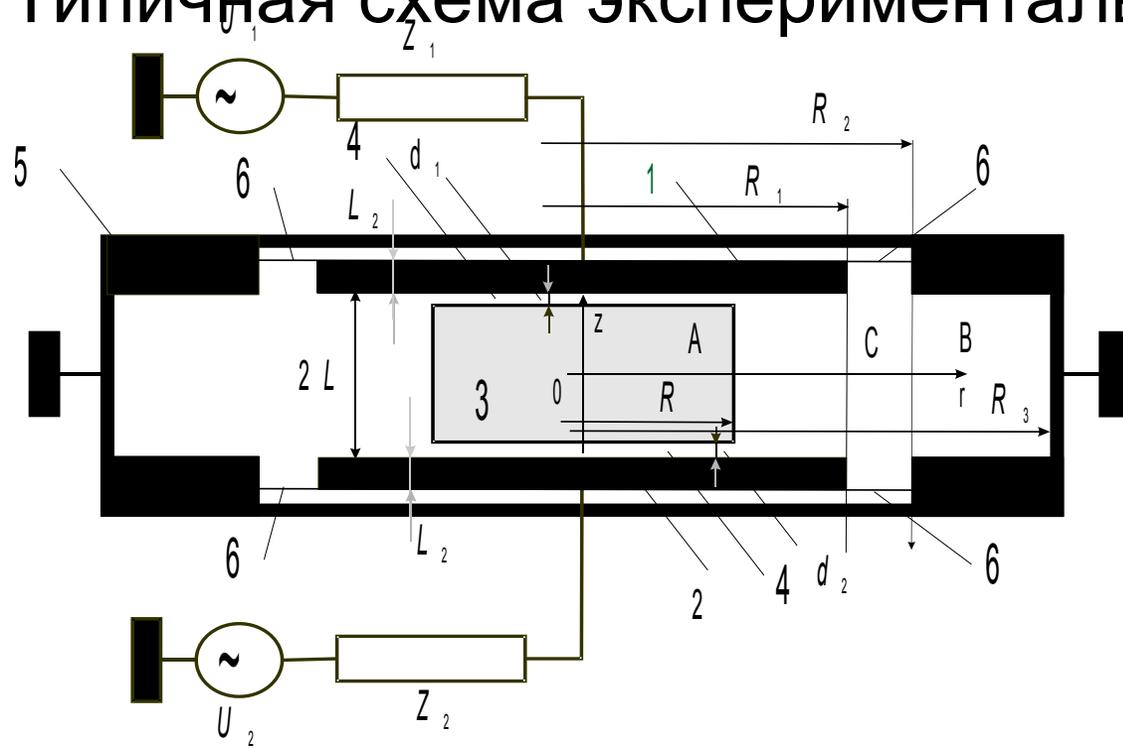
$\theta= \pi/3$

$\theta= \pi$

Циркулярно-поляризованные поперечные волны (1), (2), геликон (3), ленгмюровские (верхнегибридные) волны (4), скин-эффект (5) и Дебаевское экранирование (6). Рисунки сверху и снизу отличаются масштабом по оси  $k$ .

# Расчет импеданса плазмы с помощью программы COMSOL Multiphysics®

Типичная схема экспериментальной установки

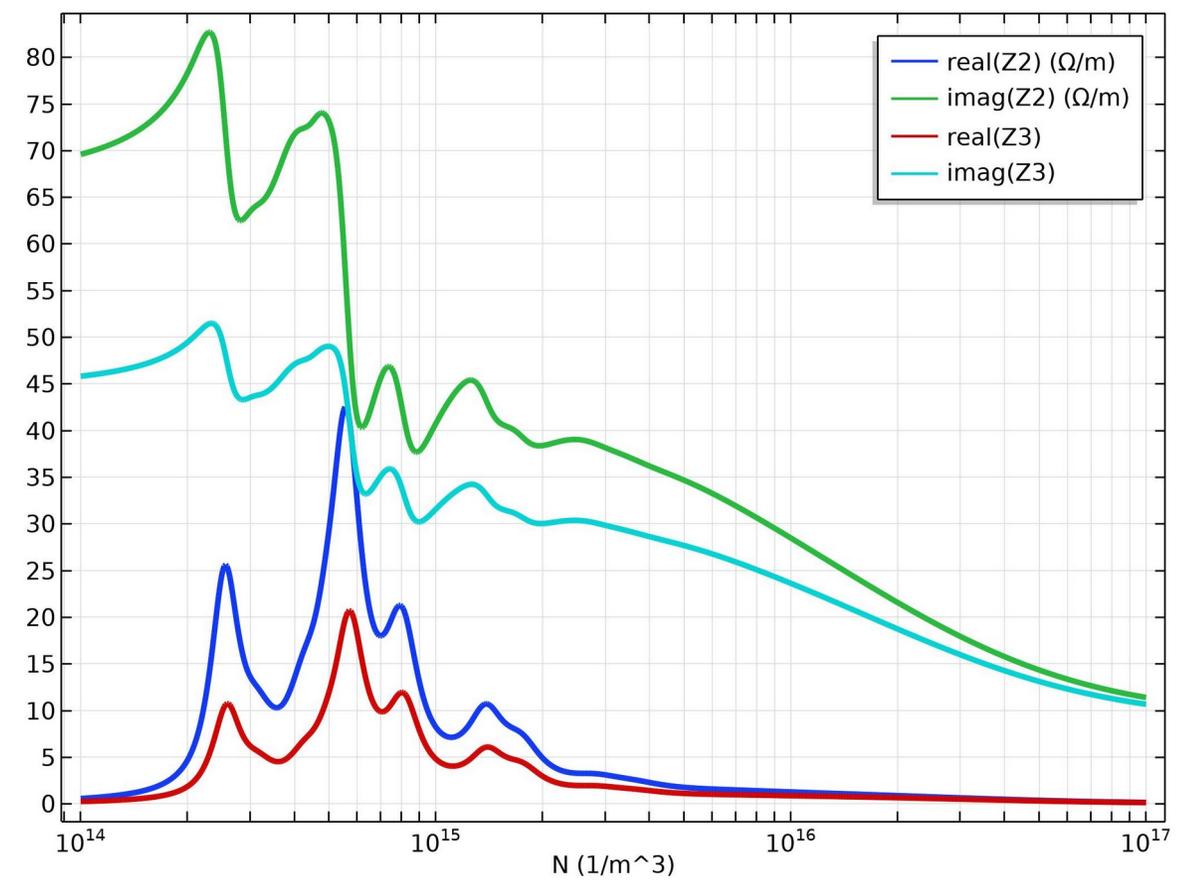
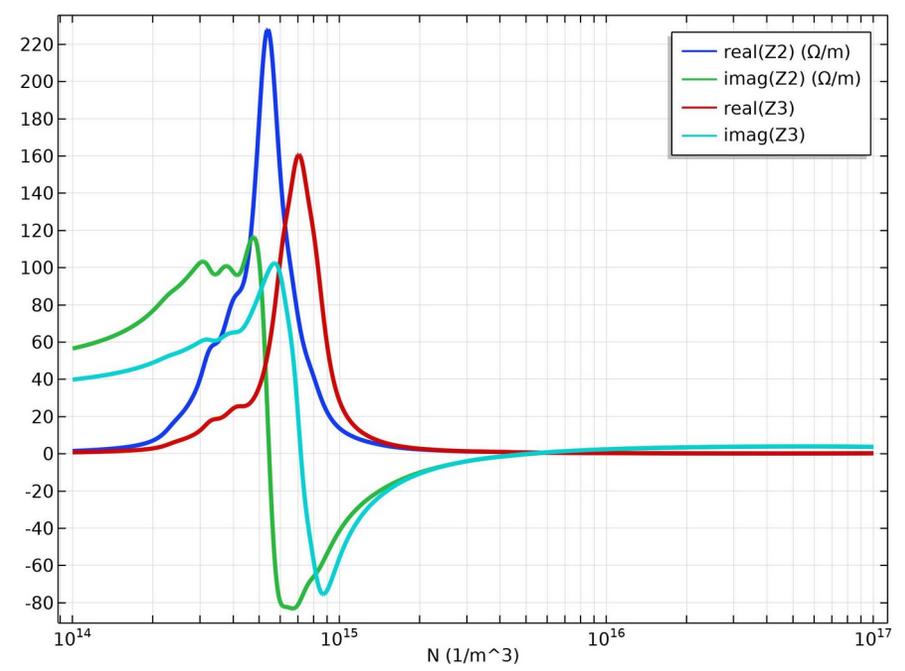
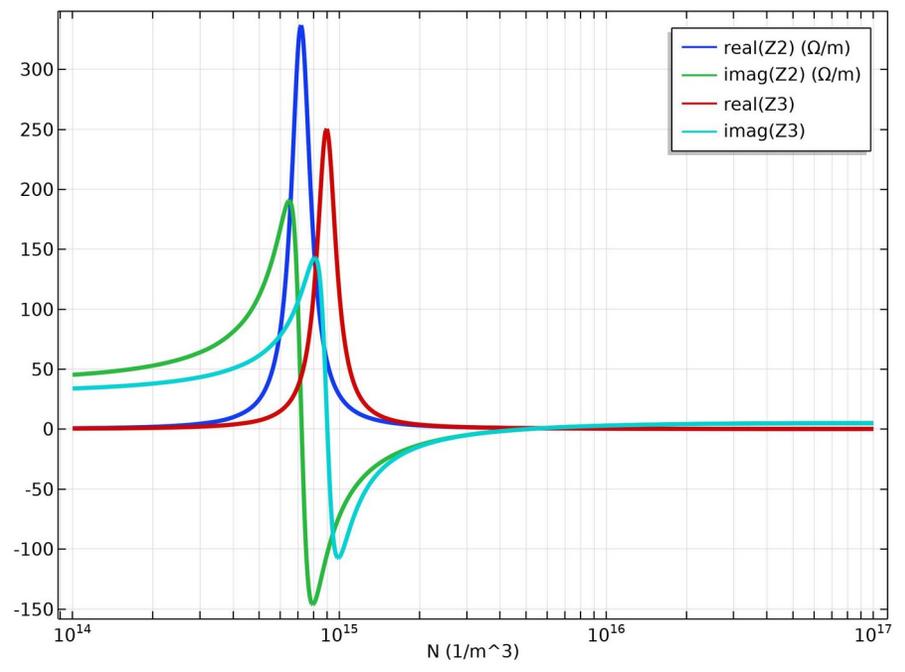
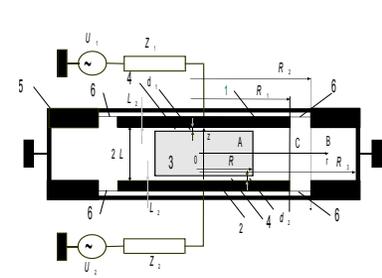


Плазма может заполнять всю камеру или заполнять ее частично (как на рисунке).

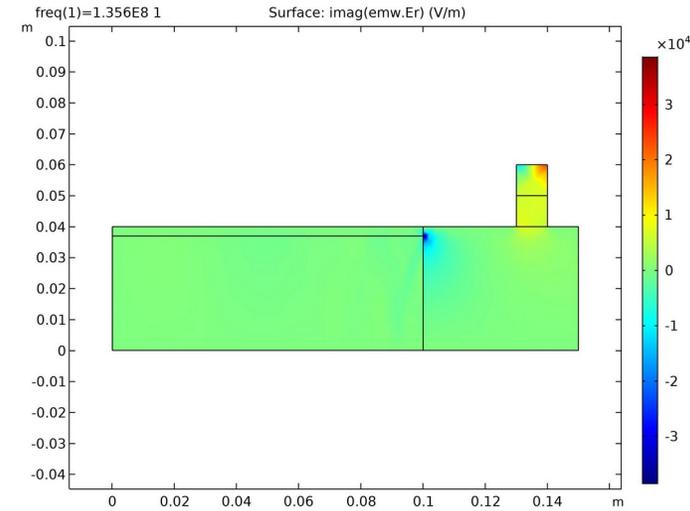
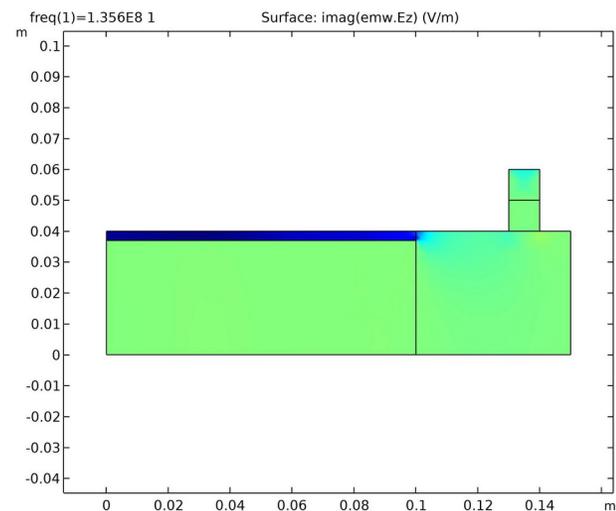
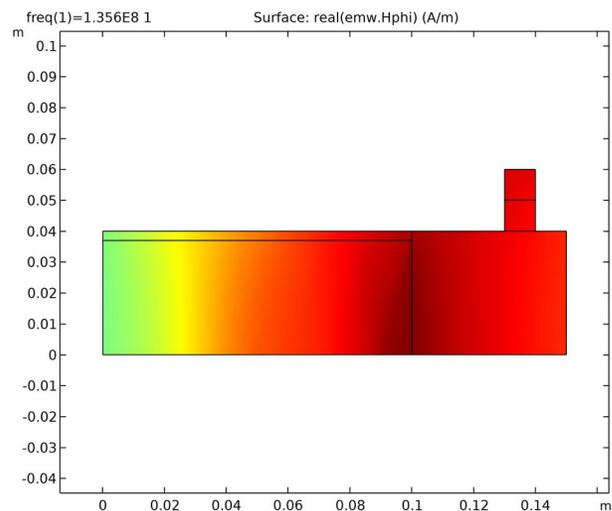
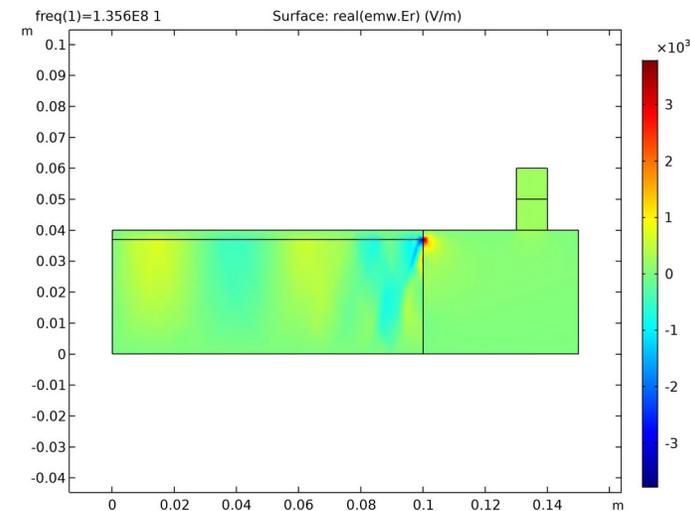
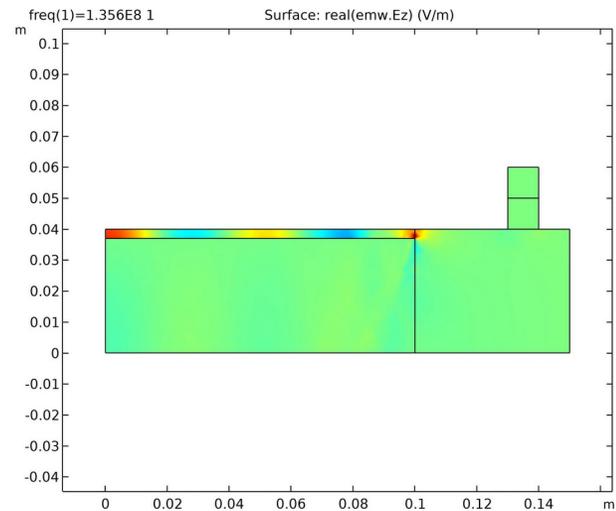
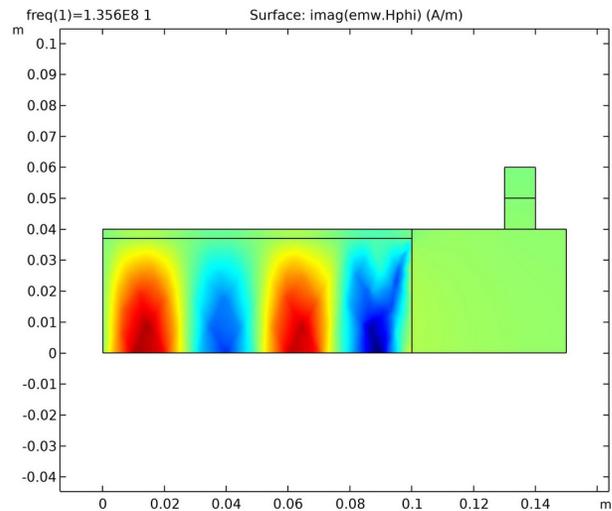
Магнитное поле однородно и направлено вдоль оси  $OZ$

1, 2 – электроды, 3 – плазма, 4 – слои пространственного заряда между плазмой и стенкой (электродами), 5 – разрядная камера, 6 – граница расчетной области, через которую идет возбуждение электромагнитного поля.  $2L$  – межэлектродное расстояние,  $d_1, d_2$  – толщины слоев пространственного заряда.

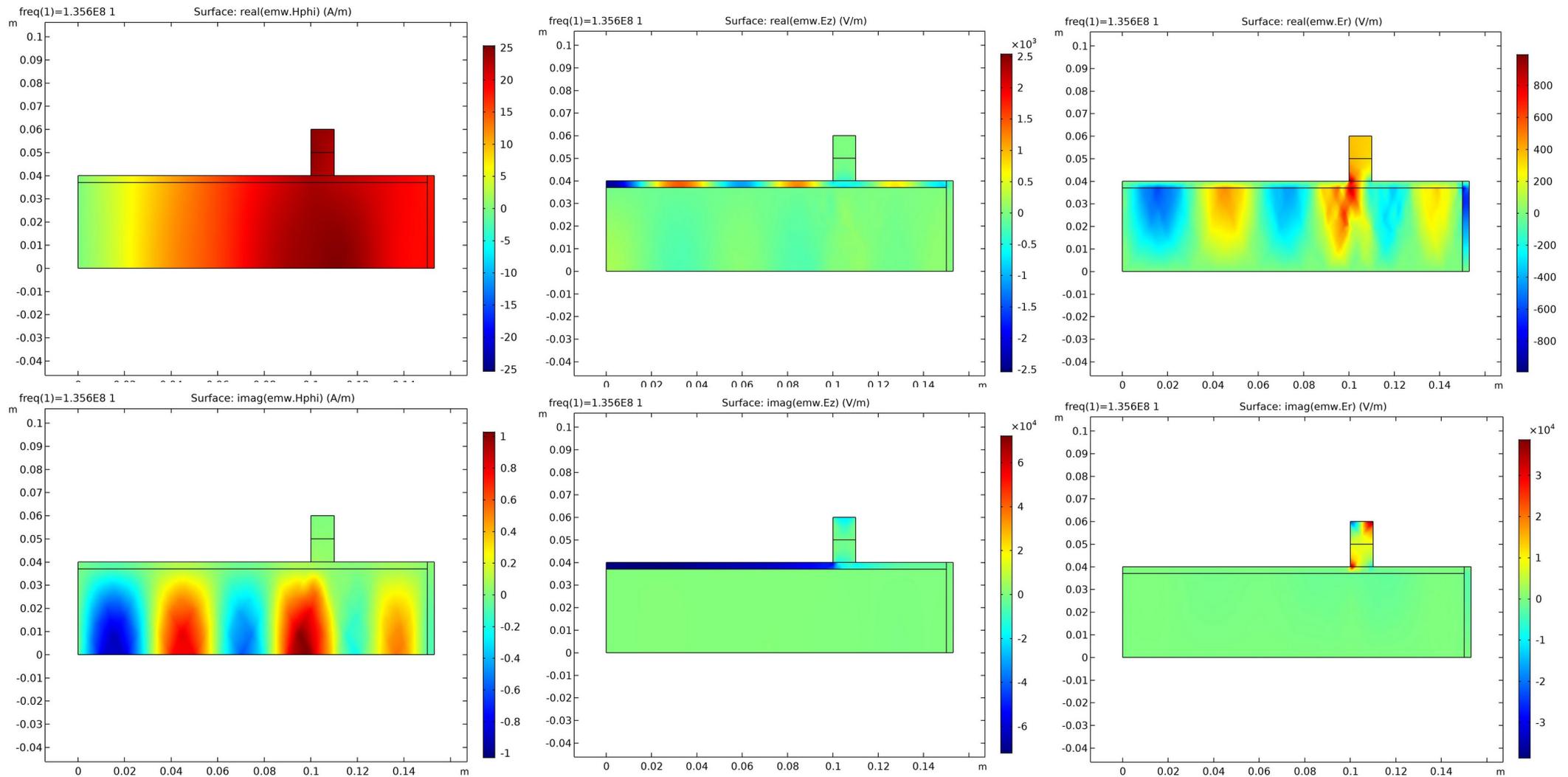
Пример расчета импеданса разряда как функции плотности электронов.  $Z2$  – импеданс на границе электрода в плоскости  $z=L$ ,  $Z3$  - импеданс в точке подвода ВЧ поля к линии передачи. Геометрия разряда соответствует распределению поля ниже.



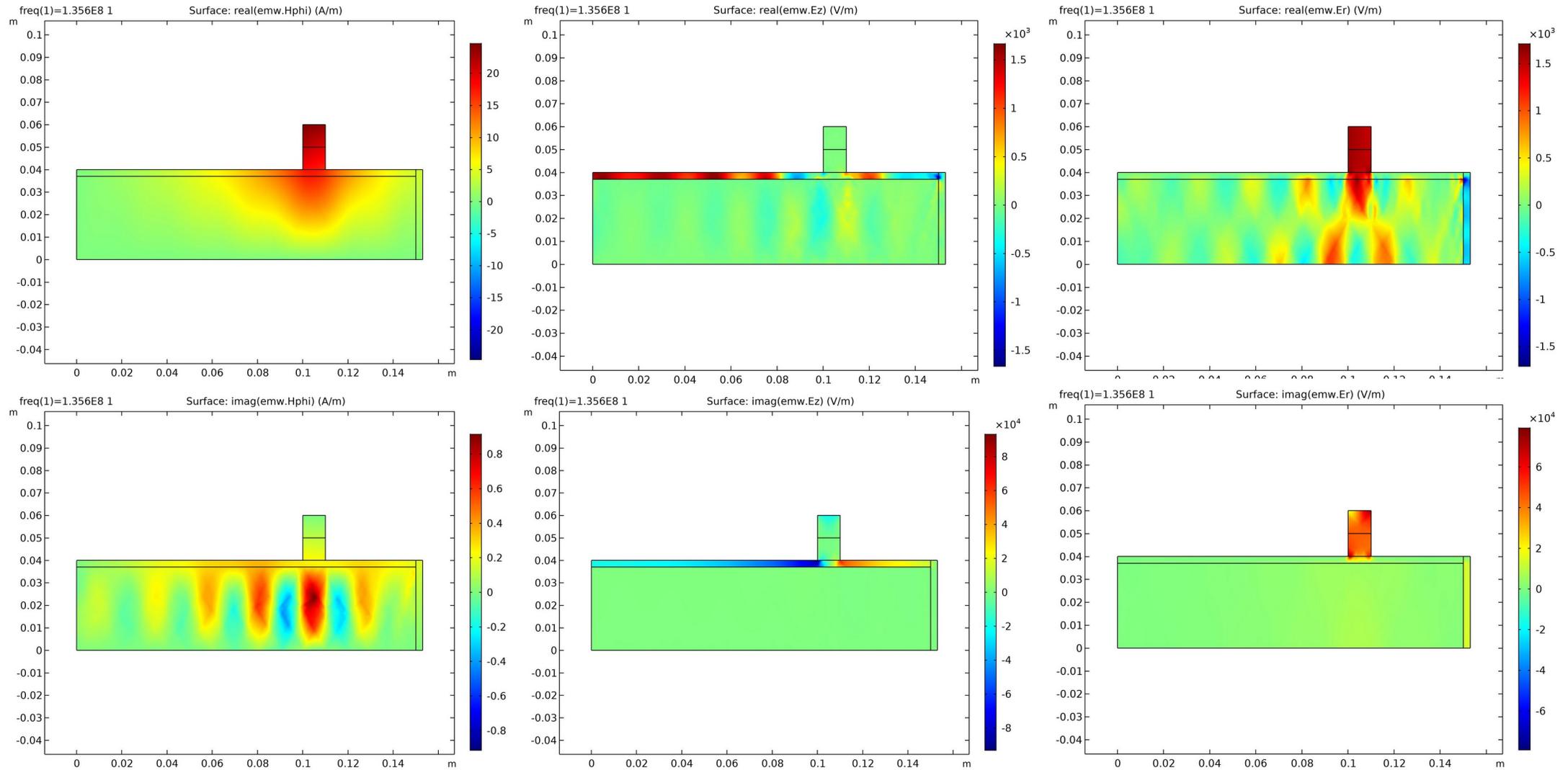
Пример расчета пространственного распределения электромагнитного поля ВЧ волны в разрядной камере, частота волны 137.6 МГц. Плотность электронов  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , циклотронная частота 500 МГц, постоянное магнитное поле направлено вдоль оси  $OZ$ , отношение частоты столкновений электронов к частоте поля – 0.1. Частичное заполнение камеры плазмой, синфазное возбуждение.



Пример расчета пространственного распределения электромагнитного поля ВЧ волны в разрядной камере, частота волны 137.6 МГц. Плотность электронов  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , циклотронная частота 500 МГц, постоянное магнитное поле направлено вдоль оси  $OZ$ , отношение частоты столкновений электронов к частоте поля – 0.1. Полное заполнение камеры плазмой, синфазное возбуждение.



Пример расчета пространственного распределения электромагнитного поля ВЧ волны в разрядной камере, частота волны 137.6 МГц. Плотность электронов  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , циклотронная частота 500 МГц, постоянное магнитное поле направлено вдоль оси  $OZ$ , отношение частоты столкновений электронов к частоте поля – 0.1. Частичное заполнение камеры, противофазное возбуждение.



# Основные результаты работы

1. Выписаны уравнения определяющие пространственное распределение для электромагнитного поля в магнитоактивной плазме.

2. Проведен расчет дисперсионных кривых волн в магнитоактивной плазме при различных условиях.

3. Проведен предварительный расчет импеданса разряда и пространственного распределения электромагнитного поля для модельной геометрии.

Проведенные расчеты могут быть основой для анализа в дальнейшем вольтамперных характеристик разряда в магнитном поле.

**Спасибо за внимание**