

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ
ПЛАЗМОВИХ КОЛИВАНЬ ПРИ ГЕНЕРАЦІЇ ПЛАЗМОНІВ В
МОДЕЛІ ХОЛОДНОЇ ПЛАЗМИ МЕТОДОМ PARTICLE-IN-CELL**

Тертишний К.А.

Науковий керівник – доцент Чубукін Олександр Сергійович
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. фізики,
м. Харків, Україна

e-mail: kostiantyn.tertyshnyi@nure.ua

e-mail: oleksandr.chubukin@nure.ua

In the work it has been shown, that the most appropriate physical model to describe plasma oscillations at plasmon generation is the cold plasma model, where to obtain an expression for the plasma oscillation we use the standard fluid equations. Special attention in work paid to the use of the Particle-In-Cell method, with the help of which, simulation and visualization of plasma oscillations were carried out, using the software code MathCad.

Плазму вважають одним із первородних станів матерії у Всесвіті. Майже 99 % видимого Всесвіту складається з плазми [1].

В плазмі вільні електрони мають можливість рухатись. При цьому, вони мають малу інерцію і велику теплову швидкість, внаслідок чого вони більш рухливі, ніж іони [2]. Під час моделювання руху частинок в плазмі, іони прийнято розглядати як статичний фон [3]. Висока теплова швидкість електронів швидко віддаляє їх від іонного фону. Кожний акт віддалення породжує електричне поле, яке притягує електрони назад до іонів і електрони починають рухатися в протилежному напрямі. Таким чином створюються коливання електронів навколо іонів, які називаються *плазмовими коливаннями*, а квант таких коливань - *плазмоном*.

При фізичному моделюванні плазмових коливань використовувалась модель холодної плазми, згідно з якою в якості вхідних параметрів взято *густину електронів n_e , швидкість руху електронів v_e , та напруженість електричного поля E* , а в якості вихідних – *плазмову частоту*. Усі ці змінні поділено на дві складові: одну - рівноважну, а іншу - таку, що виникає внаслідок збурень. Таким чином, *густина електронів, їх швидкість руху та електричне поле* запишуться як:

$$n_e = n_0 + n_1; \quad v_e = v_0 + v_1; \quad E = E_0 + E_1$$

Тут знак "0" означає рівноважну частину при відсутності коливань, а "1" - що виникає в результаті збурення коливань.

Для отримання виразу, що описує коливання плазми використовуються *рівняння безперервності (1), закон зміни імпульсу (2) (другий закон Ньютона), а також рівняння Пуассона(3)*

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nv)}{\partial x} = 0 \quad (1); \quad \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = - \left(\frac{e}{m_e} \right) E \quad (2); \quad \frac{\partial E}{\partial x} = \left(\frac{e}{\epsilon_0} \right) (n_i - n_e) \quad (3)$$

Лінеаризуючи рівняння безперервності (1), отримуємо:

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_0 + n_1) + \frac{\partial}{\partial x} (n_0 + n_1)(v_0 + v_1) = 0 \quad (4)$$

Оскільки n_0 є незмінним членом, то її похідна першого порядку за часом дорівнює нулю. Усі інші члени, рівняння (4), є або членами вищого порядку, або постійними членами. Нехтуючи ними маємо:

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} + n_0 \frac{\partial v_1}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Величини, що коливаються, поводяться синусоїдально. Тому $n_1 = n_1 \exp(i(kx - \omega t))$; $v_1 = v_1 \exp(i(kx - \omega t))$; $E = E \exp(i(kx - \omega t))$

Зробивши в (5) перетворення (заміну)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\exp(i(kx - \omega t))) \rightarrow -i\omega, \quad \text{та} \quad \frac{\partial}{\partial x} (\exp(i(kx - \omega t))) \rightarrow ik \quad (5)$$

Отримаємо рівняння (1),(2),(3) у вигляді:

$$\omega n_1 = kn_0 v_1 \quad (6), \quad i\omega v_1 = \frac{eE_1}{m_e} \quad (7), \quad ik\epsilon_0 E_1 = -en_{e1} \quad (8).$$

Комбінуючи (5)-(7) отримуємо вираз для плазмової частоти:

$$\omega = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{m_e \epsilon_0}}$$

Для комп'ютерного моделювання та візуалізації плазмових коливань в моделі холодної плазми було використано Particle-In-Cell метод, згідно якого як електрони та іони, моделювались як дискретні об'єкти, що переміщувались у безперервному полі, а їх стан обчислювався на відповідній обчислювальній сітці [4,5]. В якості обчислювальної сітки було вибрано розгорнуте в лінію кільце (рис.1), де 2 два червоних вузли, являють собою один і той самий вузол в якому розташований іон. Сітка має 9 вузлів та 8 комірок. Перший вузол вважається-нульовим, а останній - восьмим.



Рисунок. 1 Обчислювальна сітка.

Параметри плазмових коливань, відповідно до кожної з комірок визначались за наступним Particle-In-Cell алгоритмом:

1. Завантаження чисельних параметрів частинок (m_e, m_i, e, q_i) що відповідають реальним іонам і електронам.

2. Задання положення частинки в просторі для розрахунку густини заряду.

3. Вирішення рівняння Пуассона, (для визначення значення

електричного потенціалу у плазмі);
$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

4. Розрахування величини напруженості електричного поля ($\vec{E} = -\nabla \varphi$)

5. Визначення швидкості частки з другого закону Ньютона ($m\vec{a} = q\vec{E}$)

6. Визначення розташування частинок за допомогою рівняння ($\Delta \vec{x} = -\vec{v} \Delta t$)

За визначеним вище алгоритмом на основі Mathcad було написано програмний код, який дозволяв візуалізувати плазмові коливання у вигляді залежності позиції електрона від часу (рис. 2).

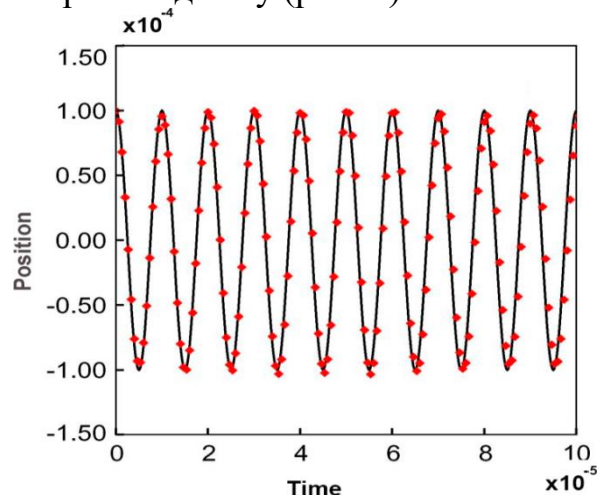


Рисунок 2. Моделювання коливань плазми. Чорна крива - теоретичне передбачення, червоні мітки - результат, отриманий за допомогою моделювання.

Список використаних джерел:

1. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion* (Springer International Publishing, Cham, 2016)

2. J.A. Bittencourt, *Fundamentals of Plasma Physics*, 3rd edn. (Springer, New York, 2004)

3. H. Motz, Plasma oscillations. *Rep. Prog. Phys.* 29(2), 305 (1966).

4. A.L. Langdon, C.K. Birdsall, *Plasma Physics Via Computer Simulation*, 1st edn. (Taylor & Francis, New York, 2005)

5. The calculation of wound tubular manometric springs sensitivity of average thickness by the shells theory method / O. Chubukin // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. - 2018. - № 1. - С. 146-152.