

Лекція 1. Основні властивості, характеристики та використання плазми

Основні властивості плазми визначаються рухом у ній заряджених частинок. У відсутності зовнішніх полів характер руху заряджених частинок у слабоіонізованій плазмі, в якій основний вплив на їх рух здійснюють зіткнення із нейтральними частинками, дуже схожий на рух звичайних атомів або молекул у газі. Якщо довжина вільного пробігу λ набагато менша за лінійний розмір плазми L ($\lambda \ll L$), траєкторія руху складається з відрізків прямих, див. Рис.1. При цьому зіткнення можна вважати точковими, оскільки ефективний радіус взаємодії заряджених частинок з нейтралами багато менший за λ .

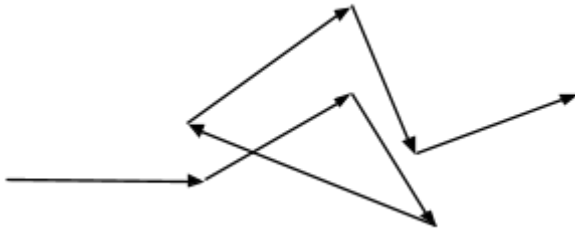


Рис.1



Рис. 2

Важлива відмінність властивостей плазми від властивостей газу нейтральних частинок пов'язана з дією електричного та магнітного полів на рух заряджених частинок. $\vec{E}'$ поле (зовнішнє поле і поле просторового заряду) може прискорювати частинки в період між їх зіткненнями. В середньому за багато актів зіткнень таке прискорення призводить до появи направленного руху частинок та до збільшення швидкості хаотичного руху, або до нагріву плазми. При цьому нагрів електронів і іонів буде неоднаковим. Як за звичай e^- отримують більшу енергію, ніж i^+ .

Магнітне поле призводить до закручування траєкторій заряджених частинок у площині $\perp \vec{H}_0$. При умовах, коли радіус обертання заряджених частинок в магнітному полі (так званий ларморівський радіус) багато менший за λ , $\rho \ll \lambda$, вплив поля на рух частинок буде дуже суттєвим. Їх переміщення в напрямку перпендикулярному до $\vec{H}_0$ на відстань більшу, ніж ларморівський радіус ($> \rho_L$) може бути зумовлено або зіткненнями, або дрейфом заряджених частинок (електричним, гравітаційним, градієнтним, тощо)

У сильноіонізованій плазмі, коли визначальну роль відіграють зіткнення заряджених частинок між собою, завдяки кулонівській взаємодії збільшується їх переріз взаємодії і він стає значно більшим за розміри атомів. Обмеження радіусу взаємодії пов'язане лише з екрануванням електричного поля у плазмі. Тому граничний радіус можна вважати рівним дебаєвському радіусу екранування r_D . А оскільки у сфері дебаєвського радіусу розміщується велика кількість електронів і іонів, то взаємодію заряджених частинок вже не можна вважати парною. Траєкторія руху частинок, якщо врахувати непарні зіткнення, не буде вже ломаною, а стає плавно змінюватися і має більш складний характер. При цьому властивості плазми можуть суттєво відрізнятися від властивостей незарядженого газу.

1.2. Основні параметри плазми

Плазма являє собою унікальний об'єкт, тому що в різних об'єктах або станах її густина може мінятися на 31 порядок, а її температура - на 8 порядків

$$n = (0,001 \div 10^{28}) \text{ cm}^{-3} \quad T_e = (0,01 \div 10^6) \text{ eV}$$

Параметри космічної плазми:

1) Іоносфера (шар E): Газ – воздух; характерний лінійний розмір $L = 10^6 \text{ cm}$, зовнішнє магнітне поле $H_0 = 10^3 \text{ э}$, густина нейтральних атомів $n_a = 10^{12} \div 10^{13}$, густина електронів $n_e \approx 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ступінь іонізації плазми $\eta = 10^{-8} \div 10^{-7}$, температура електронів $T_e = 0,03 \text{ eV}$, довжина вільного пробігу електронів $\lambda_e = 10^2 \div 10^3 \text{ cm}$, радіус Дебая $r_D = 0,3 \text{ cm}$, ларморівський радіус $\rho_{L_e} = 1 \text{ cm}$

2) Іоносфера (шар F): Газ – воздух; $L = 10^6 \div 10^7 \text{ cm}$, $H_0 = 1 \text{ э}$

$$n_a = 10^9 \div 10^{12} \text{ cm}^{-3} \quad n_e \approx 10^5 \div 10^6 \text{ cm}^{-3} \quad \eta = 10^{-7} \div 10^{-4}$$

$$T_e = 0,03 - 0,1 \text{ eV} \quad \lambda_e = 10^3 \div 10^5 \text{ cm}, \quad r_D = 0,2 \text{ cm}$$

$$\rho_{L_e} = 1 \text{ cm}$$

3) Фотосфера сонця: Газ – Н, $L = 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}$, $H_0 = 10^3 \text{ э}$,

$$n_e = 10^{14} \text{ cm}^{-3}, \quad \eta = 1,$$

$$T_e = 1 \text{ eV}, \quad \lambda_e = 5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}, \quad r_D = 5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}, \quad \rho_{\text{Л}_e} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

4) Міжзіркове середовище: Газ – Н, $L = 10^{18} \text{ cm}$, $H_0 = 1 \text{ э}$

$$n_e = 10^{-3} \div 10 \text{ cm}^{-3} \quad \eta = 0,1 \div 1$$

$$T_e = 0,01 - 1 \text{ eV}, \quad \lambda_e = 10^8 \div 10^{12} \text{ cm}, \quad r_D = 10^2 \div 10^4 \text{ cm}.$$

Характеристики газорозрядної плазми:

1. Розряд низького тиску: тиск робочого газу $P = 10^{-2}$ мм. рт. ст, потужність, що вкладається у розряд $N = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}$, $n_e = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $T_e = 3 \div 7 \text{ eV}$, розрядний струм $I = 1 \text{ A}$

2. Тліючий розряд:

$$P = 1 \text{ мм. рт. ст}, \quad N = 10^{-1} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3},$$

$$n_e = 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad T_e = 1 \div 3 \text{ eV} \quad I = 10^{-2} \text{ A}$$

3. Дуговий розряд:

$$P = 1 \text{ мм. рт. ст}, \quad N = 10 \div 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3},$$

$$n_e = 10^{13} \text{ cm}^{-3} \quad T_e = 0,5 \div 2 \text{ eV} \quad I = 10 \text{ A}$$

4. Надвисокочастотний (НВЧ) розряд:

$$P = 10 \text{ мм. рт. ст}, \quad N = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3},$$

$$n_e = 10^{12} \text{ cm}^{-3} \quad T_e = 1 \div 3 \text{ eV}$$

5. Розряд високого тиску:

$$P = 10^3 \text{ мм. рт. ст}, \quad N = 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3},$$

$$n_e = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \quad T_e = 0,5 \div 1 \text{ eV} \quad I = 1 \text{ A}$$

6. Розряд надвисокого тиску:

$$P = 10^5 \text{ мм. рт. ст.}, \quad N = 10^3 \div 10^4 \frac{\text{ВТ}}{\text{см}^3},$$

$$n_e = 10^{17} \text{ см}^{-3} \quad T_e = 0,5 \div 1 \text{ eV} \quad I = 1 \text{ A}$$

7. Стационарна лазерна плазма:

$$P = 10^3 \text{ мм. рт. ст.}, \quad N = 10^4 \frac{\text{ВТ}}{\text{см}^3},$$

$$n_e = 10^{17} \text{ см}^{-3} \quad T_e = 1 \div 3 \text{ eV}$$

8. Для низькотемпературної плазми:

$$n_e = 10^{10} \div 10^{18} \text{ см}^{-3} \quad T_e = 1 \div 10 \text{ eV}$$

9. Для високотемпературної плазми керованого термоядерного синтезу (КТС):

$$n_e = 10^{12} \div 10^{18} \text{ см}^{-3} \quad T_e = 10^2 \div 10^4 \text{ eV}$$

1.3. Прояви та використання плазми

1. **Плазму** зазвичай ділять на **низькотемпературну** (температура іонів плазми менша ніж мільйон градусів Кельвина) і **високотемпературну** (температура іонів понад мільйон градусів Кельвина). Такий поділ зумовлений як важливістю **високотемпературної плазми** у проблемі здійснення керованого термоядерного синтезу, так і відносною простотою отримання та унікальними технологічними можливостями низькотемпературної плазми. Почнемо з того, що плазма може існувати у природі і **створюватися** штучним шляхом. Плазма у природньому становищі – це плазма зірок, наприклад, нашого Сонця, це плазма міжгалактичного, міжзіркового і міжпланетного простору, це плазма іоносфери і магнітосфери, які захищають нашу Землю від радіаційної дії сонячного вітру та інших потоків частинок високих енергій. Бесперервний потік заряджених частинок (сонячний вітер) зіштовхується з земною магнітосферою, яка деформується під його дією и захищає все живе на Землі від цього потоку частинок та випромінювань, які створює цей потік. Параметри сонячного вітру:

$$n = 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3} \quad T = 10 \text{ eV} \quad T_e = 50 \text{ eV}$$

$$v = 300 \frac{\text{km}}{\text{sec}}$$

Нарешті, таке явище природи як **розряд блискавки** теж представляє собою плазму. Ще більше різних станів плазми створюється штучним шляхом для різних застосувань.

Дуже широко плазма використовується для отримання світла. Якщо ви увечері будете прогулюватися вулицями мирного міста, то можете милуватися світловими рекламами, не задумуючись про те, що в них світиться неоновіа або аргоніа плазма. Користуємося ми і лампами денного світла. А хто мав

«задоволення» зробити в електричній мережі коротке замикання, тех зустрічається з плазмою. Іскра, яка проскакує між дротами, теж являє собою плазму електричного розряду в повітрі. Дуга електричної зварки – це теж плазма.

Будь-яка речовина, яка нагріта до великих температур, теж перетворюється на плазму. Легше за все, маються на увазі витрати енергії, іонізуються пари лужних металів таких, як натрій, калій, цезій. Тому ці метали використовуються при створенні катодів, які застосовуються для іонізації газів електронними потоками, що імітуються катодом і прискорюються електричним полем. Звичайне полум'я має властивість проводити струм, тобто має електропровідність. А це означає, що в ньому присутні заряджені частинки. Воно, хоч і слабо, але іонізоване, і в деякому наближенні теж є плазмою. Для повної іонізації газу потрібна температура іонів у десятки тисяч градусів.

Плазма застосовується при розробці різних газорозрядних приладів: випрямлячах електричного струму, стабілізаторах напруги, плазмових підсилювачах і генераторах надвисоких частот (НВЧ), лічильниках космічних частинок. Усі так звані газові лазери (гелій-неоновий, кріптоновий, на діоксиді вуглецю та інше) теж є плазмові: газові суміші в них іонізовані електричним розрядом.

Властивостями, які є характерними для плазми, володіють електрони провідності у металах (тут іони жорстко закріплені у кристалічній ґратці і нейтралізують заряд електронів). Сукупність вільних електронів і рухливих «дирок» (вакансій) у напівпровідниках теж може описуватись за допомогою плазмових уявлень. Тому такі системи і звуться **плазмою твердих тіл**. Це окрема складна наука.

Існують генератори низькотемпературної плазми - **плазмотрони**, які створені на базі електричної дуги. За допомогою плазмотрону можна нагріти практично будь-який газ до 7000-10000 градусів за соті та тисячні долі секунди. Плазмотрони застосовуються у гірничо-рудній промисловості (**плазмобури**), для буріння твердих порід. На базі плазмотрону створені суперсучасні станки (**плазморізки**) з комп'ютерним управлінням для різки металічних заготовок будь-якої заданої форми з листового металу товщиною декілька сантиметрів.

Створені також коаксіальні магнітогідродинамічні (МГД) плазмові двигуни для корекції орбіти космічних апаратів дивіться рис.3.

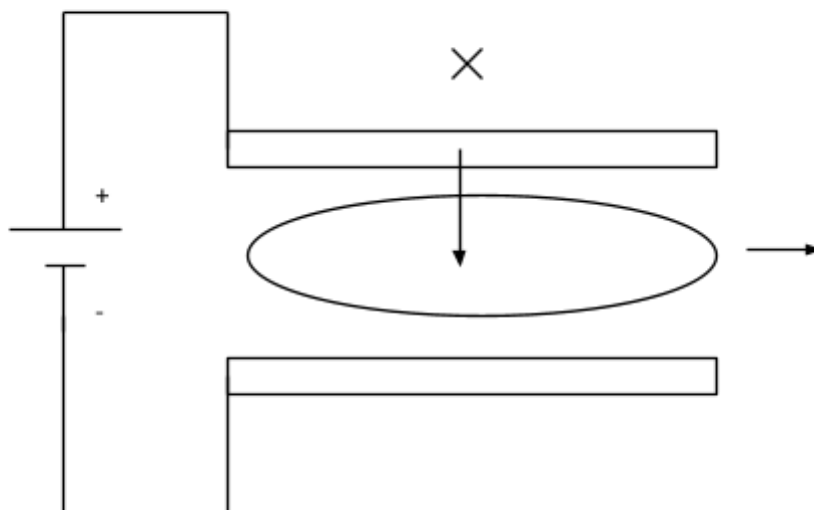


Рис. 3

На цьому рисунку наведена схема роботи МГД двигуна у планарній геометрії. Якщо у просторі між двома пласкими пластинами розмістити плазму і подати напругу на пластини, то в плазмі між пластинами потече струм. Якщо створити магнітне поле, направлене перпендікулярно до площини рисунку, то на струм буде діяти сила Ампера, яка прискорить плазму у напрямку вздовж пластин, виникає реактивна сила і система почне рухатися. У циліндричній геометрії плазма створюється у коаксіалі, а напруга подається між внутрішнім і зовнішнім циліндрами. Прискорення плазми відбувається вздовж осі циліндру. Магнітне поле у цьому випадку повинне бути азимутальним.

В такій самій геометрії працюють і системи типу «**плазмовий фокус**» для отримання надплотної плазми. В установках плазмового фокусу отримують рентгенівське випромінювання і потоки нейтронів високої інтенсивності. Плазмовий фокус може використовуватися для зажигання термоядерних реакцій в установках типу **токамак і стеларатор**. Дуже цікавою є ідея створення магнітогідродинамічного (МГД) генератора (електростанції), дія якого заснована на силі Лоренца. МГД-генератор – це енергетична установка, в якій енергія робочого тіла (плазми), що рухається у зовнішньому магнітному полі, перетворюється в електричну енергію. Принципова схема МГД-генератора зображена на рис.4.

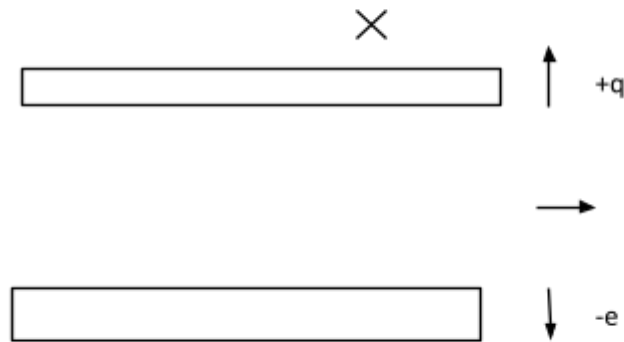


Рис. 4

У зовнішній мережі створюється електричний струм тому, що під дією сили Лоренца електрони і іони плазми рухаються у протилежних напрямках і осідають на різних електродах, створюючи різницю потенціалів.

Важливим завданням фізики плазми є створення **джерел плазми та іонів** для технологічних цілей. Існує багато типів джерел плазми і іонів. Крім плазмотронів, які вже вказувалися, створені джерела на базі тліючого, геліконного, дугового, надвисокочастотного (НВЧ), лазерного розрядів, розрядів низького, високого і надвисокого тисків. На вирішення різних технологічних задач використовуються різні типи газових розрядів.

Можна виокремити такі **плазмові технології**:

Напилення поверхневих шарів різного призначення для підвищення механічних міцнісних, фрикційних (тертя) можливостей, покращання твердості матеріалів, покращення емісійних, оптичних можливостей матеріалів.

Нанесення шарів різних матеріалів: для створення відбиваючих нейтрони покриттів на оптичні стекла; для просвітлення оптики – створення безвідбиттєвих оптичних систем; для нанесення біологічно сумісних матеріалів на імплантанти; для нанесення обеззаражуючих покриттів; для нанесення спеціальних покриттів на хірургічні інструменти, в том числі на мікроінструменти для нейрохірургії і офтальмології.

Плазмовий стан речовини дозволяє нанести покриття, які мають різні властивості на різні матеріали: метали, діелектрики, напівпровідники, полімери та для створення метаматеріалів.

Важливими є технології **травлення (зняття)** поверхневих шарів різних матеріалів різного призначення, в тому числі і для нанотехнологій, виготовлення мікрочипів і інтегральних схем.

Існує багато типів плазмових розрядів, які використовуються при створенні **озонаторів** різних модифікацій і призначення. **Озонатор** — це пристрій, який застосовується для отримання озону (O_3). Озон є алотропною модифікацією кисню, яка містить в молекулі три атоми кисню. У більшості випадків вихідною речовиною для синтезу озону є молекулярний кисень (O_2), а сам процес описується рівнянням $3O_2 \rightarrow 2O_3$. Ця реакція ендотермічна (протікає з поглинанням тепла) і легко оборотна, тобто озон може легко перетворюватися у двоатомний молекулярний кисень. Тому на практиці застосовуються заходи, які забезпечують максимальне зміщення її рівноваги в сторону цільового

продукту. Озон отримують у тихому розряді, різних типах бар'єрного розряду, коронному і дуговому розрядах, при пучково-плазмовому розряді. Озонатори можна використовувати у медичних цілях: для заживлення ран, для дезінфекції приміщень, знезараження медичного інструменту та інших поверхонь, для збереження продуктів, для вирішення екологічних проблем.

Із створенням плазмотрону з'явилася нова галузь науки - **плазмова хімія**: багато хімічних реакцій прискоряються або протікають тільки у плазмовому струмені. У плазмохімії використовують плазму, яка отримується у електродугових, високочастотних і НВЧ газових розрядах, в ударних трубах, установках адіабатичного стиснення та іншими засобами. В плазмохімії важливим є розподіл низькотемпературної плазми на квазірівноважну, яка існує при тисках близьких до атмосферного і вище, і нерівноважну, яка отримується при тисках менши 30 кПа і в якій температура вільних електронів значно перевищує температуру молекул та іонів. Цей поділ пов'язаний з тим, що кінетичні закономірності квазірівноважних процесів визначаються тільки високою температурою частинок, що взаємодіють, тоді як специфіка нерівноважних процесів обумовлена великим вкладом хімічних реакцій, які ініціюються «гарячими» електронами.

Прикладом плазмохімічної технології служить синтез ацетилену із природнього газу (електродугова піч, 1600 °C): $2\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + 3\text{H}_2$. Широко використовується плазмохімія при виробництві полімерів, переробці відходів полімерів у водень, при обробці поверхонь полімерів, при вирішенні екологічних проблем процесів, пов'язаних з полімерами.

Важливе застосування має наука «**Плазмова оптика**», яка досліджує фізику проходження пучків заряджених частинок через плазму, засоби змінення характеристик потоків заряджених частинок (фокусування, поворот, обернення, ушільнення, розрідження) і формування електромагнітних випромінювань, які мають необхідні властивості.

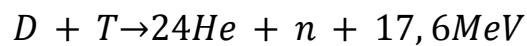
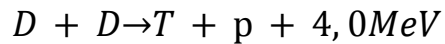
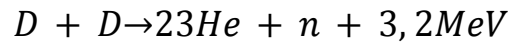
Це далеко не повний перелік застосувань фізики плазми. Гадаю, я зміг переконати Вас в тому, що цю науку треба вивчати, що вона потрібна, що вона важлива.

На мій погляд, головними застосуваннями фізики плазми є **плазмова електроніка (ПЕ)** і **керований термоядерний синтез (КТС)**. Глибоко ці наукові і технічні проблеми, які з'являються у зв'язку з необхідністю їх вирішення, ми будемо розглядати окремо, а зараз тільки ознайомимося із суттю цих наук.

Починаючи з 50-х років минулого сторіччя з'явилася нова наука, яка зветься - «**плазмова електроніка**», вивчає засоби генерації внутрішніх електричних і магнітних полів, значно більших ніж внутрішньоатомні поля, за допомогою пучків заряджених частинок, які рухаються в плазмі. Ці внутрішньоплазмові поля використовуються для генерації і підсилення електромагнітних випромінювань великої потужності і різних діапазонів довжин хвиль, прискорення заряджених частинок, для плазмохімії та екології. Можливість отримання надвеликих внутрішньоплазмових полів дозволяє розробляти різні схеми плазмового прискорення заряджених частинок до

енергій, значно перевищуючих енергій електронів в 1 TeV на відстанях у декілька метрів замість десятків кілометрів, які потрібні для отримання таких енергій за допомогою вакуумних прискорювачей.

Головним завданням фізики плазми є вирішення проблеми керованого термоядерного синтезу. Термоядерні ми є реакції синтезу більш важких з ядер легких елементів (в першу чергу ізотопів водню - дейтерія D і трітія T), які протікають при дуже високих температурах. Деякі реакції синтезу мають такий вигляд:



У природніх умовах термоядерні реакції відбуваються на Сонці та інших зірках: ядра водню з'єднуються один з одним, утворюючи ядра гелію. При цьому виділяється значна кількість енергії. Штучна, некерована, імпульсна реакція термоядерного синтезу була вперше відтворена у водневій бомбі. А мова йде про створення реактора, в якому можна здійснити керовану термоядерну реакцію, в якій кількість отриманої енергії перевищувала б кількість енергії, яку треба витратити на реалізацію реакції. Для протікання реакції необхідно створити плазму з температурою іонів $T = 10^4 \text{ eV}$, концентрацією іонів понад десять в 14 ступені в кубічному сантиметрі. Крім того необхідно ще виконати так званий критерій Лоусона: добуток концентрації іонів на час утримання плазми магнітним полем спеціальної конфігурації повинно бути більше десяти у 14 ступеню. Цей критерій витікає з балансу енергій, вкладеної і отриманої. Зараз у Франції, у м. Кадараш будується грандіозний за розмірами і технічному наповненню термоядерний реактор INTER з нульовим виходом. В разі реалізації цього проєкту буде отримана електроенергія, рівна вкладеній для спричинення термоядерної реакції.