

ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДІЇ КОРПУСКУЛЯРНИХ ПОТОКІВ НА ЕЛЕМЕНТИ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

І.І.Опачко¹, Б.Я.Хом'як²

¹ Ужгородський національний університет, вул. Підгірна, 46,
Ужгород, 88000

² Мукачівський технологічний інститут, вул. Ужгородська, 26,
Мукачево, 89600

Під час дії імпульсного лазерного випромінювання на конденсовану мішень компоненти лазерної плазми за своїми енергетичними параметрами наближаються до параметрів космічного випромінювання. В роботі досліджено основні параметри компонент лазерної плазми і підтверджено можливість їх взаємодії з поверхнею, моделюючи таким чином дію корпускулярних складових космічного випромінювання.

Попередні зондові і мас-спектрометричні дослідження характеристик і динаміки лазерної плазми, створеної дією лазерного випромінювання густин потужностей $\sim 10^8 \div 10^{10}$ Вт/см² на поверхню твердого тіла показали, що імпульс інтегральної іонної емісії може моделювати корпускулярний потік космічних часток, а випромінювання ядра плазмового згустку – радіаційне космічне випромінювання. Це дає можливість використовувати таку лазерну плазму для експериментів, які дозволяють спрогнозувати дію на елементи космічних апаратів (КА) (елементи сонячних батарей, ілюмінатори, детектори космічного випромінювання та ін.) космічного випромінювання з характерними параметрами корпускулярних потоків $V = 400 \div 700$ км/с; $T = 5 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^5$ К; $(4,3 \div 43$ еВ), $n \sim 1 \cdot 10^7$ см⁻³ [1]. Метою постановки таких досліджень є мінімізація деградації конструктивних елементів КА у процесі їх експлуатації.

Детальні дослідження динаміки емісії іонізованих та нейтральних компонент проводилися з застосуванням запропонованої раніше комплексної зондової та мас-спектрометричної методик визначен-

ня параметрів плазмового згустку на пізній стадії розльоту [2]. Експериментальний комплекс (рис. 1) складався із лазера, часопролітного мас-спектрометра з електростатичним аналізатором, систем зондів і реєстрації.

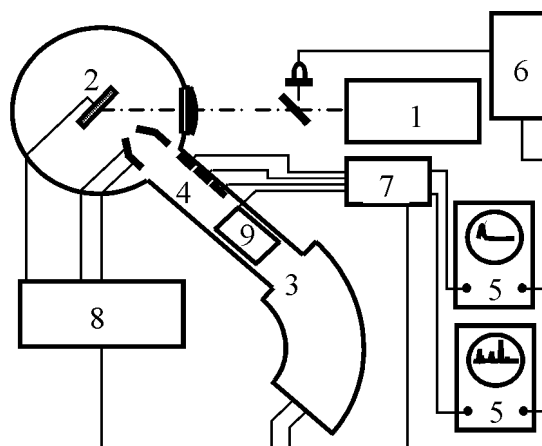


Рис. 1 Схема експериментального комплексу. 1 — лазер; 2 — вакуумна камера взаємодії лазерного випромінювання з мішенню; 3 — часопролітний мас-спектрометр; 4 — зонди; 5 — система реєстрації іонного сигналу; 6 — регульована лінія затримки; 7 — блок комутації; 8 — блок живлення; 9 — пересувний електростатичний аналізатор з взірцями конструктивних елементів КА.

Випаровування та іонізація поверхні мішені здійснювалися сфокусованим випромінюванням неодимового або ексимерного ХеСІ-лазера ($q = 3 \cdot 10^7 \div 5 \cdot 10^{10}$ Вт/см²). Для реєстрації нейтральних компонент застосовувався метод їх іонізації електронним пучком перед зондом або входом мас-спектрометра. Таке поєднання реєструючої апаратури давало змогу досліджувати мас- та енергетичні спектри емітованих компонент і реконструювати форму інтегрального імпульсу емісії. В ролі мішеней застосовувалися графіт, алюміній, кремній.

Осцилограми інтегральної емісії компонент при опроміненні алюмінієвої мішені випромінюванням густиною потужності $q = 3 \cdot 10^7$ Вт/см² представлено на рис. 2.

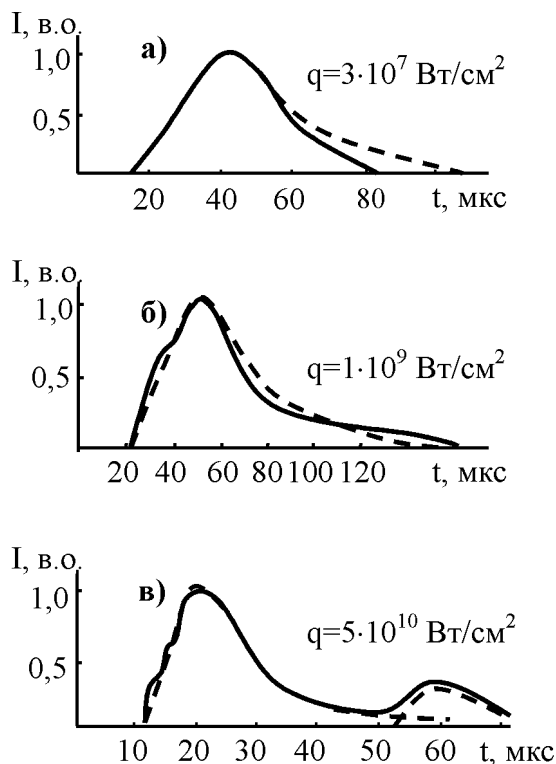


Рис. 2. Осцилограми інтегральної іонної емісії під дією випромінювання ХеСІ лазера.

Зокрема на рис. 2а представлено сигнал з зонда на відстані $L = 80$ см, а також реконструйований імпульс, що відповідає ефективному показнику адиабати $\gamma = 3$ (одномірний режим випаровування). Повне співпадіння отриманого експери-

ментально імпульсу емісії іонізованих і нейтральних компонент з розрахованим у припущенні моделі локальної термодинамічної рівноваги дало змогу визначити температуру фокальної плями $T = 0,22$ еВ. Коректність обчисленої таким методом температури підтверджується вимірними нами раніше зондовим методом і методом поглиначів значення температур для С і А1 плазми, отриманої дією неодимового лазера на поверхню відповідних мішеней, які співпадають з обчисленими з точністю 30%.

Енергетичні розподіли іонізованих компонент алюмінію для різних значень поверхневої густини потужності q наведено на рис. 3.

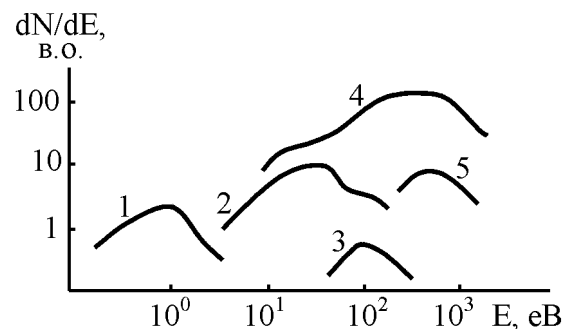


Рис. 3. Енергетичні спектри, отримані при опроміненні алюмінієвої мішені випромінюванням ХеСІ-лазера. 1 — Al^+ , $3 \cdot 10^7$ Вт/см²; 2 — Al^+ , $1 \cdot 10^9$ Вт/см²; 3 — Al^{2+} , $1 \cdot 10^9$ Вт/см²; 4 — Al^+ , $5 \cdot 10^{10}$ Вт/см²; 5 — Al^{2+} , $5 \cdot 10^{10}$ Вт/см².

Вимірювання кількості емітованих часток методом профілографії кратера та інтегрального заряду в колі мішені дали можливість визначити, застосовуючи кінетичну модель або модифіковану модель розвинутого випаровування, ряд параметрів плазми у фокальній області. Реально отриманий сигнал з зонда (рис. 2б) загально описується теоретичною залежністю, хоча на передньому фронті імпульсу іонної емісії помітний додатковий максимум, а спад заднього фронту затримано наявністю плато. Мас-спектрометричний аналіз емітованих компонент дає змогу віднести максимум до емісії іонів Al^{2+} , а наявність плато – до низькоенергетичних іонів і нейтральних

атомів з енергією ~ 4 еВ «двогорбого» розподілу емітованих компонент за енергіями. Температура ядра, що відповідає даній формі імпульсу, складає 2,12 еВ.

Подальше збільшення q до $5 \cdot 10^{10}$ Вт/см² призводить до появи «двогорбого» характеру інтегральної іонної емісії (рис. 2в). У цьому випадку 1-й максимум інтенсивності корпускулярного потоку описується залежністю [3]

$$I = \frac{A}{t^5} \exp \left[- \frac{(\gamma - 1)^2 L^2 m}{8 \gamma k T t^2} \right],$$

де A — стала, γ — ефективний показник адиабати, L — відстань мішень-зонд, m — маса атома, T — ефективна температура плазмового згустку, t — час з температурою ядра 10,7 еВ, а 2-й - з температурою 1,23 еВ. При цьому степінь іонізації зростає від 0,07 до 0,15.

Варто також мати на увазі, що розліт компонент лазерної плазми проходить у тілесному куті ~ 1 ср, тому їх концентрація на відстані L від мішені оцінюється $n(L) \sim \frac{1}{L^3}$, де N — кількість випарених атомів. Для $L = 1$ см \div 10 м змінюється в межах $n - 3 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^7$ см⁻³, а час взаємодії компонент плазми з досліджуваною поверхнею розраховується згідно сигналу з

зонда $t \sim L$ і для $L = 1$ см \div 10 м складає $10^{-6} \div 10^{-3}$ с. Швидкості компонент лазерної плазми знаходяться в інтервалі $1 \div 80$ км/с і можуть регулюватися густиною потужності лазерного випромінювання на мішені.

Температура ядра плазмового згустку при густині потужності лазерного випромінювання на мішені $q = 10^{10} \div 10^{11}$ Вт/см² досягає $T = 10 \div 30$ еВ, що робить його інтенсивним наносекундним джерелом ВУФ і м'якого рентгенівського випромінювання з енергіями квантів $10 \dots 10^3$ еВ. Підтвердженням цього є зображення свічення ядра плазмового згустку в діапазоні енергій квантів ($E > 3$ кеВ), отримане з допомогою камери-обскури та Ве-рентгенівського фільтра.

Для моделювання дії корпускулярних потоків на елементи КА лазерна плазма спрямовувалася на різні мішені (Si, C, Fe). Відбиті від мішеней частки реєструвались часопротітним мас-спектрометром за методикою [4]. Експериментально була підтверджена можливість ідентифікації компонент лазерної плазми розсіяних поверхнею твердого тіла. Таким чином у лабораторних умовах можна змоделювати дію корпускулярних потоків космічного випромінювання, апробувати реєструючу апаратуру для визначення його параметрів [4].

Література

1. Э.Гибсон, Спокойное Солнце (Мир, Москва, 1977).
2. І.І.Опачко, Л.Л.Шимон, Б.Я.Хом'як, Журнал фізичних досліджень 1, 46 (1996).
3. І.І.Опачко, Дис... д-ра фіз.-мат. наук (К., 1998).
4. І.І.Опачко, Космічна наука і технологія 11, 68 (2005).

LASER-PLASMA MODELING OF CORPUSCULAR FLUX ACTION ON SPACE APPARATUS ELEMENTS

I.I.Opachko¹, B.Ya.Khomyak²

¹ Uzhhorod National University, Pidhirna str., 46, Uzhhorod, 88000

² Mukachevo Institute of Technology, Uzhhorod str., 26 Mukachevo, 89600

Under irradiation action of a solid target by pulsed laser radiation the energy parameters of the laser plasma components are close to that of cosmic radiation. The main parameters of the laser plasma components were studied and the possibility of interaction of laser pulses with the surface was confirmed, thus modeling the action of corpuscular components of the cosmic radiation.