

МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЇ ОЧИСТКИ ІЛЮМІНАТОРІВ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

© І. І. Опачко

Ужгородський національний університет

Запропонована модель очистки ілюмінаторів під дією випромінювання імпульсних лазерів ІЧ-, видимого та УФ-діапазонів. Експериментально підтверджений нетепловий характер екстракції забруднень.

Для вирішення наукових і практичних задач необхідно очищувати (екстрагувати) осажені на поверхню прозорих (в певному оптичному діапазоні) матеріалів непрозорі плівки. При цьому допускається дія лазерного випромінювання на напилений на поверхню шар тільки з тильної сторони після проходження ним товщі прозорого матеріалу. Завдання такого роду необхідно вирішувати зокрема для очистки ілюмінаторів пілотованих космічних апаратів, що забруднюються під час входу в атмосферу ерозійними продуктами розпилення корпусу, а також віконцев плазмових технологічних камер, хімічних реакторів та ін., коли прямий доступ з боку напиленого шару неможливий.

Для розв'язання цієї проблеми нами була запропонована очистка з допомогою лазерного випромінювання [6].

Розглянемо процеси, що протікають при дії лазерного випромінювання на плівку з тильної сторони. На початковій фазі випромінювання поглинається непрозорою внутрішньою поверхнею плівки, а далі незначна частина через випромінювання в приповерхневому шарі через теплопровідність передається прозорій поверхні ілюмінатора, нагріваючи її, а більша частина внаслідок того, що температуропровідності матеріалів плівки та ілюмінатора відрізняються на 2—3 порядки, йде на нагрівання плівки.

Опис процесів, що проходять при цьому, можна розбити на дві частини.

1. Нагрівання прозорої підкладки (вікна ілюмінатора) внаслідок поглинання склом довгохвильового $\lambda = 10.6$ мкм випромінювання CO_2 -лазера [3].

2. Нагрівання, випаровування внутрішньої поверхні непрозорої плівки.

Як показали проведені дослідження, процес випаровування (екстракції) плівок С, Ті, починається при досягненні значення $q = q_{\text{кр}} \approx 5 \cdot 10^8$ Вт/см², що

практично збігається з межею випаровування масивних зразків. При $q = 10^9$ Вт/см² товщина екстрагованої за імпульс плівки досягає $h \approx 10 \dots 15$ мкм, що значно перевищує товщину випаровуваного шару при опроміненні мішені з фронтальної сторони. Як матеріал ілюмінатора досліджувались пластинки з кварцового скла С5-1 товщиною 25 мм з напиленими на них плівками С, Ті товщиною $h = 0.5 \dots 15$ мкм. При $q \geq 5 \cdot 10^9$ Вт/см² відбувалось сколювання поверхні скла з утворенням мікрокаверн та тріщин з остаточною напруженнями, які в умовах перепаду тисків між поверхнями ілюмінатора $\Delta p = 10^5$ Па можуть призвести до його руйнування. Для очистки ілюмінаторів застосовувались неодимовий лазер ($\lambda = 1.06$ мкм; $E = 1$ Дж; $\tau = 25$ нс), лазер на парах міді (ЛПМ) ($\lambda = 0.5106$ мкм; $E = 2$ мДж; $\tau = 20$ нс) та ексимерний ХеСІ-лазер ($\lambda = 0.308$ мкм; $E = 0.25$ Дж; $\tau = 30$ нс). Фокусування лазерного випромінювання на плівку здійснювалось через товщу ілюмінатора з тильної сторони. Процес руйнування плівки фіксувався візуальним спостереженням поверхні в оптичний мікроскоп після дії лазера, а динаміка процесу досліджувалась за допомогою швидкісного квантового підсилювача яскравості (КПЯ). Разом з тим з допомогою часово-пролітного мас-спектрометра за методикою [5] досліджувалась емісія іонів з тильної сторони, що виникають при руйнуванні плівок. Для цього був модифікований діагностичний комплекс (рис. 1), який крім лазерів включав: вакуумну камеру 2 взаємодії лазерного випромінювання з поверхнею ілюмінатора, з'єднану з дрейфовою трубкою часопротітного мас-спектрометра 3, який працював у режимі часового фокусування; систему зондів 4 для реєстрації іонного сигналу на різних відстанях від мішені; систему реєстрації іонної і нейтральної складових емітованих часток; КПЯ на базі активного елемента лазера на парах

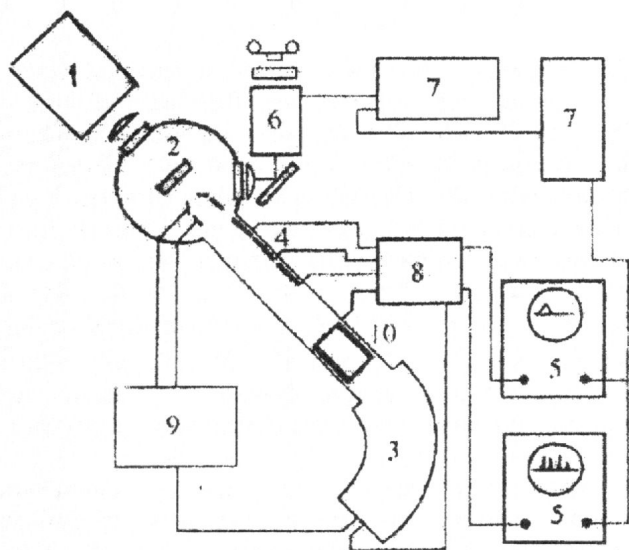


Рис. 1. Схема експериментального комплексу: 1 — нагрівальний лазер, 2 — вакуумна камера взаємодії лазерного випромінювання з мішенню, 3 — часопротіний мас-спектрометр, 4 — зонди, 5 — система реєстрації йонного сигналу, 6 — квантовий підсилювач яскравості, 7 — регульована лінія затримки, 8 — блок комутації, 9 — блок живлення, 10 — пересувний електростатичний аналізатор

міді з часовим розділенням 25 нс та підсиленням 10^4 . При значеннях $q = 10^9$ Вт/см² в мас-спектрах спостерігаються іони Ti^+ , C^+ , C_3^+ з енергіями 1—1.5 еВ. Практична відсутність в емісії компонентів скла вказує на те, що скло не руйнується. Підвищення імпульсної густини потужності до $q = 5 \cdot 10^9$ Вт/см² для ХеСІ-лазера і 10^{10} Вт/см² — для неодимового та ЛПМ приводить до появи на поверхні скла мікрокаверн, а в мас-спектрах при цьому з'являються компоненти Si^+ , O^+ , що відповідають його хімічному складу. Дослідження мікрокаверн у поляризаційному мікроскопі вказують на наявність остаточних напружень на очищеній поверхні ілюмінатора, які під впливом різниці тисків можуть спричинити його руйнування. На рис. 2 показано залежності товщин екстрагованих плівок від густини потужності лазерного випромінювання для різних лазерів. При сталому значенні q максимальна товщина плівки $h \sim d$, де d — діаметр плями фокусування, і складає $h = (0.05...0.07)d$. Просвітлення опроміненої ділянки плівки в залежності від її товщини (1...10 мкм) відбувається з затримкою 20...50 нс по відношенню до максимуму лазерного імпульсу. В залежності від діаметра фокальної плями ефективність видалення матеріалу плівки з поверхні N_N/E_n (N_N — число атомів, E_n — енергія лазера) в 5...20 разів перевищує ефек-

тивність випаровування компонентів при опроміненні поверхні з фронту. Ці дані дають змогу вважати описаний нижче механізм відповідальним за видалення поверхні плівки.

Розглянемо процеси, що відбуваються при опроміненні плівки з тильної сторони. Можливим механізмом руйнування плівки, а також поверхні скла можуть бути: 1) температурні напруження, 2) напірні тиски пари, що утворюється при випаровуванні внутрішньої поверхні плівки, 3) оптичний пробій на поверхні та всередині скла.

1. Температурні напруження виникають при різкому локальному нагріванні, і максимально допустиму величину ΔT можна визначити [3] так:

$$\Delta T = 3\sigma_{розр}(1 - \gamma)/(1 - \gamma)\beta E = 3700 \text{ К}, \quad (1)$$

де $\sigma_{розр}$ — межа міцності на розрив, γ — коефіцієнт Пуассона, E — модуль Юнга, β — коефіцієнт лінійного розширення. В даному випадку ΔT набагато перевищує температуру розм'якшення скла $t = 1300$ °С, значення якої прийемо за вихідне при оцінці параметрів нагрівання.

2. Межу міцності скла на стиск $\sigma = 6.5 \cdot 10^8$ Па [4] прийемо за верхнє значення напірного тиску плазми, утвореної між склом і плівкою. Як показують результати мас-спектрометричних досліджень, при $q \leq 10^9$ Вт/см² ці тиски не перевищують значення $P \leq (3...5) \cdot 10^8$ Па.

3. Оптична міцність поверхні діелектрика залежить від багатьох факторів (довжини хвилі, чистоти, однорідності) і для кварцевого скла складає $q \leq (2...5) \cdot 10^9$ Вт/см². Крім того, при застосуванні лазерів з високою частотою слідування (наприклад ЛПМ) температура поверхні не встигає релаксувати у міжімпульсний період. У цьому випадку існує обмеження на середню потужність лазера W [3]:

$$\Delta T = \frac{W}{\pi k d} e^{-vd/(4\kappa)}, \quad (2)$$

де k і κ — коефіцієнти тепло- і температуропровідності, d — діаметр фокальної плями, v — швидкість її переміщення, $\Delta T \approx 1300$ °С — максимально допустима температура нагрівання скла.

Для розмірів $d = 10$ см, необхідних для досягнення випромінюванням ЛПМ $q = 10^9$ Вт/см², маємо

$$v = -\frac{4\chi}{d} \ln \frac{\pi k d \Delta T}{P} \approx 0.1 \text{ м/с}, \quad (3)$$

а це при міжімпульсному інтервалі $t_n = 10^{-4}$ с дає змогу в область, що відповідає розмірам плями фокусування d , накладати $N = d/(vt) = 10$ імпульсів з частковим перекриттям. При цьому буде реалізуватись суто імпульсний характер дії лазерного

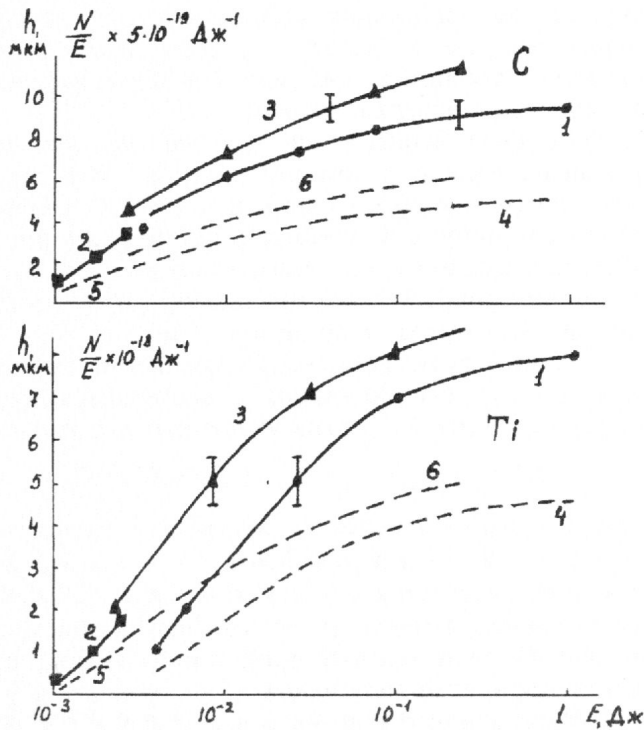


Рис. 2. Залежність максимальної товщини екстрагованих Ті- та С-плівок (1, 2, 3) та енергетичної ефективності екстракції (4, 5, 6) від енергії лазерного випромінювання, отримані при $q = 10^9$ Вт/см²: 1, 4 — неодимовий лазер; 2, 5 — ЛПМ; 3, 6 — Хе-СІ-лазер

випромінювання.

Розглянемо найбільш імовірні процеси, відповідальні за екстракцію плівок з поверхні скла при їхньому опромінненні з тильної сторони (рис. 3).

1. На початку лазерного імпульсу проходить поглинання і нагрівання колової ділянки поверхні діаметром $2R$, з холодною межею, жорстко закріпленою на поверхні скла. Внаслідок теплового розширення лінійні розміри плівки (коло) збільшуються та проходить її відшарування від скла. Об'єм V , що утворився між плівкою і склом, складає

$$V = \pi R^3 \sqrt{\frac{3\beta \Delta T}{8}}, \quad (4)$$

а максимальний прогин h_m —

$$h_m = R \sqrt{3\beta \Delta T / 2}. \quad (5)$$

Процес термічного відшарування і випаровування всередину об'єму починається при дотриманні одночасно слідуючих умов:

$$\Delta h < h_m,$$

$$h \leq \sqrt{\chi \tau_a},$$

де Δh — товщина випаровуваного за імпульс шару, h — загальна товщина плівки. При опромінненні з фронтальної сторони проходить розвиток процесу випаровування. Зростає тиск пари, що приводить до додаткового прогину поверхні відшарованої плівки і збільшені об'єму під нею. Тиск досягає свого значення, характерного для випаровування без перешкод. Умова (5) для $\beta \approx 10^{-5}$, $\Delta T = 1300$ К запишеться як $h_m = 0.15R$, і на початковій стадії лазерного імпульсу ($q = 3 \cdot 10^7$ Вт/см², $\Delta h = 0.01$ мкм) мінімальний радіус фокальної плями, що відповідає розвинуту випаровуванню, становить $R > h/0.15 = 7 \dots 1.5$ мкм.

У плямі таких розмірів (в центрі) починається випаровування, яке завершується прогином відшарованої плівки з кінцевим тиском P , який визначається параметрами пари між вигнутою плівкою і підкладкою. Характерний час наростання тиску $t_p = \Delta h / v \geq 10^{-8}$ с, де $v \approx 100$ см/с — типова швидкість випаровування поверхні. Неважко показати, що в деформованій плівці товщиною h виникають напруження

$$\sigma_n = K \cdot \frac{PR^2}{h^2}. \quad (6)$$

При умові $\sigma_n > \sigma_p$, де σ_p — межа міцності плівки, проходить її розрив і виліт осколків.

Розглянемо загальні закономірності видалення плівок. З газодинамічної теорії [2] тиск лазерної плазми становить

$$P \sim \rho \varepsilon \sim q^{-\frac{2\beta+1}{3\alpha-2\beta-1}} \cdot q^{2\alpha/3\alpha-2\beta-1} \sim q^p \sim E^p / R^{2p}, \quad (7)$$

де $p = 2\alpha - 2\beta - 1/3\alpha - 2\beta - 1 = 0.50 \dots 0.75$ параметр, який залежить від степені іонізації газу. Максимальна товщина екстрагованої плівки

$$h \sim (PR^2)^{1/2} \sigma^{-1/2} \sim E^{p/2} R^{1-p} \sigma_p^{-1/2}. \quad (8)$$

З іншого боку, при варіаціях E і R має забезпечуватись оптимальне значення $q \geq q_{\min}$, або

$$q \sim E/R^2 = \text{const}. \quad (9)$$

Комбінуючи (8) і (9), маємо

$$h \sim E^{1/2} \sigma_p^{-1/2}. \quad (10)$$

Кількість випарених атомів

$$N \sim hR^2 \sim hE E^{3/2}, \quad (11)$$

а ефективність випаровування

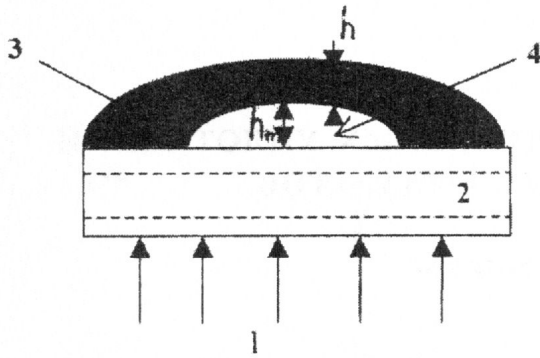


Рис. 3. Схема лазерної очистки ілюмінаторів: 1 — сфокусоване лазерне випромінювання, 2 — ілюмінатор, 3 — нагріта відшарована плівка, 4 — об'єм між відшарованою плівкою і ілюмінатором, заповнений плазмою з тиском P

$$N/E \sim E^{1/2}. \quad (12)$$

В результаті проведених досліджень в підтвердження запропонованої моделі можна зробити такі висновки.

1. Існує вузький інтервал густин потужності $q \approx 5 \cdot 10^8 \dots 3 \cdot 10^9$ Вт/см², в якому є ефективною очистка поверхні ілюмінаторів при її опроміненні з тильної сторони без порушення поверхні.

2. Максимальна товщина екстрагованої плівки досягає 10...15 мкм і при зменшенні енергії наносекундного лазерного випромінювання зменшується пропорційно до \sqrt{E} .

3. Максимальна товщина екстрагованої плівки зростає із зменшенням довжини хвилі.

4. В діапазоні енергій лазерного випромінювання $E_n = 0.002 \dots 0.1$ Дж при $q = 10^9$ Вт/см² (що відповідає $R = 0.06 \dots 0.4$ мм) максимальна товщина екстрагованої плівки $h = KR$ ($K = 0.02 \dots 0.03$) до значень $h \leq \sqrt{\kappa \tau_n}$.

5. Мінімальні пошкодження ілюмінатора відбуваються при застосуванні короткохвильового ексімерного лазера в робочому інтервалі значень q .

6. В досліджуваному інтервалі q і $h = 0.5 \dots 15$ мкм ефективність видалення компонентів $N/E \sim E$ і в 15...20 разів перевищує ефективність при лазерно-плазмовому випаровуванні [1].

7. Величина (e/N) , що характеризує середню енергію, необхідну для екстракції одного атома складає 1.3...3 еВ для Ti і 0.5...1.5 еВ для C, що менше, ніж відповідні енергії випаровування (4.2 еВ для Ti і 7.2; 4.0; 2.6 еВ/атом при випаровуванні фрагментів C, C₂, C₃ відповідно). Це свідчить про нетепловий характер екстракції.

8. Хоча енергія зв'язку атома вуглецю в ґратці більша, ніж атома титану, ефективність екстракції графіту вища.

9. Енергії слабоіонізованих компонентів ($\alpha \approx 10^{-6} \dots 10^{-5}$) складають 1...1.5 еВ, а сам процес емісії затримується по відношенню до лазерного імпульса на 20...50 нс.

10. Процес екстрагування плівки проходить стадії: нагрівання — терморозширення — початкове відшарування — часткове випаровування з тильної сторони — зростання тиску — розрив відшарованої плівки — відліт фрагментів.

1. Анисимов С. И., Имас Я. Н., Романов Г. С. и др. Действие излучения большой мощности на металлы. — М.: Наука, 1970.—272 с.
2. Афанасьев Ю. В., Крохин О. Н. Высокотемпературные и плазменные явления, возникающие при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом // Физика высоких плотностей энергии. — М.: Мир, 1974.—С. 311—353.
3. Мачулка Г. А. Лазерная обработка стекла. — М.: Сов. радио, 1979.—136 с.
4. Физические величины. Справочник. Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М., 1991.—С. 12—32.
5. Опачко І. І., Шимон Л. Л., Хом'як Б. Я. Динаміка іонної емісії при резонансному і нерезонансному поглинанні лазерного випромінювання плазмою на поверхні твердого тіла // Журн. фіз. досліджень.—1996.—1, № 1.—С. 46—51.
6. Опачко І. І. Особливості лазерної очистки ілюмінаторів // Вісник Ужгородського ун-ту. Сер. «Фізика».—1999.—5.—С. 56—61.

LASER PURIFICATION MODEL FOR SPACECRAFTS ILLUMINATORS

I. I. Opachko

The model of illuminators purification by pulse lasers of the IR, visible and UV bands is proposed. Non-thermal character of impurities extraction is experimentally proved.