

ЛЕВИЦЬКИЙ Сергій

к.т.н., ст. дослідник,

МІНАКОВ Володимир

к.т.н.,

ТАРАНОВ Віктор

к.т.н.,

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова

Національної академії наук України (Київ, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СО₂-ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Стрімке поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сучасних військових операціях та цивільних застосуваннях потребує розвитку нових методів протидії. Лазерні системи високої потужності стають одним з пріоритетних напрямів створення засобів ураження БПЛА завдяки високій точності, миттєвості дії та можливості вибіркового впливу. Одним із найперспективніших джерел для ураження конструкційних матеріалів БПЛА є СО₂-лазери, що працюють у середньому ІЧ-діапазоні (10,6 мкм), де полімери та композити демонструють високий коефіцієнт поглинання.

Для забезпечення ефективності лазерного впливу необхідне розуміння порогів пошкодження матеріалів, з яких виготовляються корпусні елементи, кріплення, оптичні куполи, електронні плати та інші частини БПЛА. До таких матеріалів належать композитні обшивки, склопластики, полікарбонат, текстоліти різної товщини, органічне скло, фанера та ДВП.

Метою цієї роботи є експериментальне визначення порогів лазерно-індукованого пошкодження для типових конструкційних матеріалів БПЛА при опроміненні СО₂-лазером у безперервному та імпульсному режимах, з аналізом впливу потужності, тривалості імпульсу та фокусування променя.

Дослідження проводилися на CO₂-лазері потужністю до 50 Вт (довжина хвилі 10,6 мкм). Реалізовано два режими роботи:

1. Імпульсний режим з фокусуванням: потужність 20 Вт; фокусуєча лінза ZnSe, $f = 125$ мм; діаметр фокальної плями $\approx 0,1$ мм; щільність потужності в точці фокуса $\approx 2,5$ МВт/см²; тривалість впливу — до пробиття або помітного пошкодження.

2. Безперервний режим (CW), без фокусування: потужності 3–21 Вт; діаметр плями на відстані 30 см ≈ 4 мм; щільність потужності ≈ 80 Вт/см²; тривалість імпульсу 320, 640, 1280 мс; експозиція здійснювалась серіями імпульсів.

У всіх випадках вимірювались: тривалість впливу, кількість імпульсів, розмір отворів, загальна енергія, щільність енергії.

Досліджено 12 різновидів матеріалів, характерних для БПЛА: композит «Орлан» (1,5 мм), купол «Орлан» (полікарбонат), текстоліти 0,6–3 мм (звичайні та фольговані), вініпласт 10 мм, органічне скло 5 мм, фанера 4 мм, ДВП 5,7 мм, пластик 1 мм.

Результати досліджень

1. *Імпульсний режим з фокусуванням.* Отримані пороги пошкодження показали, що при фокусуванні променя утворення отворів досягається при щільності енергії:

- ✓ для тонких пластиків та текстолітів 190–230 кДж/см²,
- ✓ для середньої товщини матеріалів (ДВП, фанера, оргскло) ≈ 750 –1300 кДж/см²,
- ✓ для найбільш стійких матеріалів (композит «Орлан», текстоліт 3 мм): 2500–6000 кДж/см².

Найменшу стійкість показали пластик корпусу електроніки та текстоліт 0,6 мм. Найбільшу – текстоліт товщиною 3 мм та композитна обшивка «Орлан».

2. *Безперервний режим без фокусування.* У CW режимі пороги пошкодження суттєво нижчі за щільністю енергії через більшу площу нагріву:

- ✓ для композиту «Орлан» пробиття досягається при $\approx 1,35$ –1,53 кДж/см²,

- ✓ для купола (полікарбонат) $\approx 0,23-0,30$ кДж/см²,
- ✓ для текстоліту (2 мм) $\approx 0,57-1,02$ кДж/см².

Виявлено важливий ефект: збільшення тривалості імпульсу (320→1280 мс) зменшує загальну енергію, необхідну для пошкодження, завдяки ефективнішому тепловому накопиченню.

Пошкодження корпусних елементів підтверджується рядом фото, з аналізу яких можна зробити ряд висновків:

- ✓ чіткі отвори з мінімальною термічною зоною – у фокусованому режимі;
- ✓ широкі зони обуглення – у CW режимі;
- ✓ розшарування текстоліту та фанери;
- ✓ сильне обуглення фольгованого текстоліту без пробиття через відбивання мідного шару.

Обговорення. Порівняльна лазерна стійкість матеріалів. Найменша стійкість: полікарбонат (купол), тонкі текстоліти (0,6–0,8 мм), пластик електрокорпусу 1 мм. Середня стійкість: фанера, ДВП, оргскло, вініпласт. Найвища стійкість: текстоліт 3 мм, композитна обшивка «Орлан», фольгований текстоліт. Різниця зумовлена теплопровідністю, відбивною здатністю, пористістю, типом полімерної матриці та наявністю армування.

Фокусування збільшує локальну щільність енергії на 3–4 порядки, що забезпечує швидке пробивання. Без фокусування руйнування відбувається переважно через повільне прогрівання та обуглення з великими зонами теплового ураження.

Практичні рекомендації для систем протидії БПЛА. Для пробиття корпусу БПЛА потрібна щільність енергії: 500–6000 кДж/см² (сфокусований режим).

Найчутливіші елементи для ураження: оптичні куполи, крила та тонкі елементи конструкції, корпуси електроніки, кабелі, текстолітові плати.

Ефективність збільшується при використанні довгих імпульсів (500–1500 мс). Захисні покриття можуть суттєво підвищити стійкість (IR-відбивні шари, абляційні покриття).

Висновки

У роботі проведено системний експериментальний аналіз впливу CO₂-лазерного випромінювання на основні матеріали конструкцій БПЛА. Встановлено: значну різницю в лазеростійкості полімерів, композитів та деревинних матеріалів, високу ефективність сфокусованого променя для пробивання, зменшення порогу пошкодження при збільшенні тривалості імпульсу у CW режимі, вирішальну роль теплових властивостей та структури матеріалу.

Отримані дані є основою для розробки лазерних систем ураження БПЛА, оцінки їхньої ефективності та створення нових матеріалів із підвищеною стійкістю.