

Д.В. СОКІРКАЄВ, О.А. ЗАРУДНИЙ, канд. техн. наук

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ БЕЗДРОТОВОЇ ЛАЗЕРНОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

Вступ

Технологія бездротової передачі енергії привернула значну увагу в останні роки завдяки застосуванню нових матеріалів та технологій для генерації та прийому лазерного випромінювання, що покращило характеристики лазера і підвищило ефективність всієї ланки бездротової передачі [1, 2].

Лазерна передача енергії (ЛПЕ) вважається потенційно ефективним способом постачання енергії, особливо в бездротових системах на великі відстані і в суворих небезпечних умовах навколишнього середовища. На відміну від інших методів бездротової передачі енергії (БПЕ), ЛПЕ має свої переваги, наприклад менший розмір пристрою, сфокусований напрямок передачі енергії, відсутність радіочастотних перешкод для існуючих засобів зв'язку і висока щільність потужності.

Завдяки таким перевагам систему ЛПЕ можна використовувати для бездротової передачі енергії в нафтовій промисловості, де така система може допомогти уникнути проблем пов'язаних з електромагнітними перешкодами і високими температурами. Також, за допомогою лазерів можна забезпечити бездротове живлення акумуляторів БПЛА, мобільних пристроїв, робототехніки і аерокосмічних апаратів, що може підвищити надійність і термін їх служби.

Бездротова лазерна передача енергії – це технологія передачі електроенергії, в якій енергія передається за допомогою лазерного променя. Лазерний промінь випромінюється оптичним джерелом і потім поглинається фотоелектричною панеллю для перетворення лазерного променя в електрику, як показано на рис. 1.

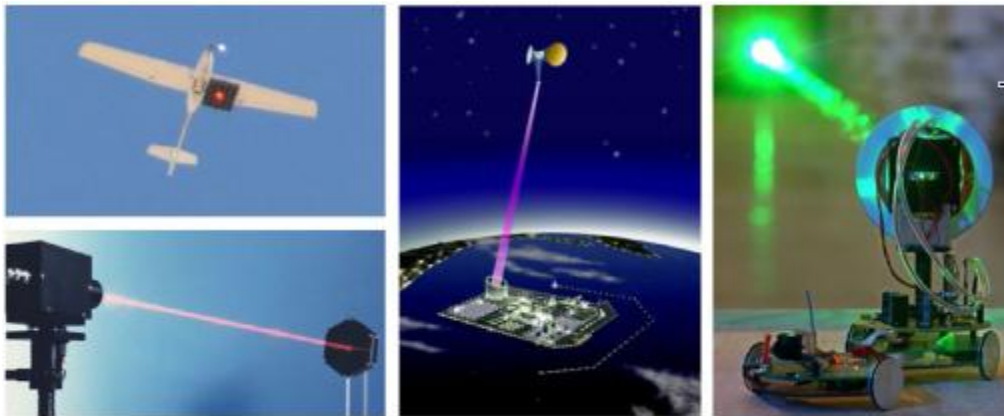


Рис. 1. Використання лазерів в бездротових системах передачі енергії

Загальна структура ЛПЕ зображена на рис. 2. Блок живлення лазера використовується для генерації необхідного і стабільного струму для лазерного випромінювача (ЛВ). ЛВ перетворює електроенергію в лазерне випромінювання, а потім передає його через канал передачі. Приймач складається з фотоелементів, які використовуються для поглинання лазерного випромінювання і перетворення його в струм. Крім того, до системи може бути доданий контролер потужності для випрямлення електричного струму.



Рис. 2. Загальна структура системи бездротової лазерної передачі енергії.

Таким чином, ефективність системи ЛПЕ залежить від потужності лазерного випромінювання і ефективності поглинання цього випромінювання на приймальній стороні для перетворення його в струм, а також, слід враховувати втрати в середовищі через яке проходить лазерний промінь [1 – 3].

Лазерні випромінювачі, що використовуються в системах ЛПЕ

Лазерний випромінювач відіграє вирішальну роль у системі ЛПЕ. Для забезпечення максимальної ефективності електрооптичного перетворення енергії необхідно використовувати лазер з високою ефективністю. В даний час широко використовуються потужні напівпровідникові лазери завдяки їх компактній і міцній структурі, низькій вартості і простоті експлуатації. Однак такі лазери мають низьку когерентність вихідного лазерного променя і великий кут розбіжності, що робить їх непридатними для безпосереднього використання в бездротовій передачі енергії на великі відстані. Щоб подолати цю проблему, лазерний промінь повинен пройти колімацію, гомогенізацію та інші процеси формування для покращення його однорідності та спрямованості. Дослідження та їх результати щодо ефективності бездротової передачі за допомогою лазерів по відношенню до довжини хвилі наведено у табл. 1 [1 – 16].

Таблиця 1

Довжина хвилі, нм	ККД (%)	Потужність лазера, Вт	Рік
266	28	1,4	1999
	23	23	2001
	24,7	28,4	2006
355	7	12	2000
	25	1,62	2009
	35,6	3,1	2011
490	25	1,8	2002
532	14,2	20	1998
	65,2	131	2000
	61	62	2007
	74,6	11,2	2013
	48	32	2019
	40,9	321	2021
670	42	0,9	2003
808	50	8	2003
	42		
885	52,4	2,1	2008
	63	1,36	2001
912	38,8	6,9	2018
915	72,6	15,3	2022

940	53	200	2013
980	25	0,0012	1995
	27	0,0027	1996
	31	0,0031	2007
	51	3500	2008
1028	45	99,6	2012
1060	44	11	2006
	21	6,9	2018
1120	71	322	2014
	53,5	25,3	2018
1908	43,5	5,49	2019
2070	31	4,8	2004
2100	42	43	2005

У 2013 р. в [4] розробили лазерні системи на прямих діодах, які могли виробляти багатокіловатні рівні потужності з ефективністю перетворення, яка перевищувала 50 % для промислових застосувань. Подальший прогрес призвів до розробки діодних лазерних платформ, які об'єднали кілька випромінювачів в єдину потужну систему. В цих системах використовувалася спеціалізована оптика, така як волоконні з'єднувачі і коліматори, для об'єднання і фокусування променів, максимізуючи при цьому потужність і ефективність [4]. До 2015 р. лужнопарові лазери з діодним накачуванням досягли потужності 2,5 кВт, причому 90 % загальної потужності було сконцентровано в межах лазерної спектральної лінії, як зазначено в [5]. Потужність діодних лазерів з волоконним накачуванням може досягати до 100 Вт за допомогою щільного мультиплексування з поділом по довжині хвилі [5]. У [6] показали, що високояскраві прямі діодні лазери досягли 44 % ефективності перетворення при потужності 4 кВт. Тонкоплівкові фільтри були розроблені для полегшення комбінування щільного пучка хвиль з ефективністю 40 % [6]. У 2017 р. стеки лазерних установок виробляли 50-400 Вт, а у поєднанні з пластинчастими радіаторами з водяним охолодженням та налаштовані на одну довжину хвилі дозволило досягти навіть рівня потужності 4 кВт [7]. У 2018 р. в [8] запропонували раманівський волоконний лазер на основі раманівського розсіювання до 8 порядків. Максимальна вихідна потужність становила 6,9 Вт, а ефективність накачування – 21 %. У 2019 р. один широкозонний лазерний діод випромінював 3,5 Вт, а група з восьми таких лазерних діодів – 38 Вт [9]. У 2020 р. 1,5 см силікатне волокно, леговане Nd^{3+} , використали як волокно підсилення для побудови одночастотної волоконної лазерної системи DBR (distributed Bragg reflector – розподілений бреггівський відбивач). Ця система випромінювала центральну довжину хвилі 1120 нм, порогова потужність становила 10 мВт з шириною смуги пропускання 71,5 кГц [10]. Того ж року в роботі [11] продемонстрували безперервний двоххвильовий лазер з композитним кристалом $\text{Nd}:\text{GdVO}_4/\text{Nd}:\text{YVO}_4$ на довжинах хвиль 1063 і 1064 нм. На довжині хвилі 912 нм використовувалася діодна накачка при цьому регулювання спектрального співвідношення потужностей двох довжин хвиль лазера відбувалось за допомогою зміни температури. Максимальна сумарна вихідна потужність, що генерувалася лазером, становила 4,48 Вт. Ефективність перетворення світло-світло – 38,8 % [11]. У 2021 р. автори роботи [12] виготовили двоступеневі біполярні каскадні 905 нм лазери під назвою VCSEs (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser), ефективність електрооптичного перетворення становила 52,4 %. У 2022 р. було розроблено п'ятиперехідний вертикально-порожнинний поверхнево-випромінюючий лазер з довжиною хвилі 905 нм, а також підготували 19-елементну матрицю з максимальною вихідною потужністю 58,3 Вт, а ККД становило 55,4 % [13]. В [14] представили дизайн, конструкцію та характеристики компактного діодного лазера з розширеною порожниною у конфігурації Літтроу. Він працює на довжині хвилі 780,24 нм з максимальною вихідною потужністю 35 мВт. Результати показали спектральну ширину лінії 340 кГц з використанням гомодинного методу і стабільність частоти 0,47 МГц [14]. В одному з останніх досліджень продемонстрували LD-лазер з ефективністю перетворення потужності, що досягає 72,6 %

при робочій потужності 15,3 Вт і 67,3 % при робочій потужності 30 Вт при температурі радіатора 25 °С [15].

Завдяки інтенсивним дослідженням і розробкам лазерні випромінювачі за останнє десятиліття досягли значного покращення потужності, ефективності та щільності випромінювання. Досягнення в техніці комбінування променів, методах з'єднання волокон і діодних лазерних платформ зробили можливим виробництво потужних промислових лазерних систем. У майбутньому, ймовірно, відбудуться подальші вдосконалення технологій виробництва і джерел накачування лазера для підвищення його ефективності.

Високоєфективні приймачі лазерного випромінювання

У приймальній частині системи ЛПЕ головним завданням є прийом і перетворення енергетичного сигналу, що передається у вигляді лазерного випромінювання, в електричний струм, який може бути використаний для електроживлення приладів або зарядки акумулятора. Для приймання лазерної енергії зазвичай використовують оптично-електронні перетворювачі (ОЕП), спеціально розроблені для ефективного перетворення монохроматичної світлової енергії. В останніх дослідженнях використовують кремній (Si) або арсенід галію (GaAs) як світлопоглинаючі матеріали, оскільки вони підтримуються добре налагодженими виробничими лініями у фотоелектричній промисловості. Нещодавні роботи показали, що ОЕП на основі GaAs досягли вражаючого ККД понад 70 % [30].

Основні параметри цих двох матеріалів наведені в табл. 2 [16].

Таблиця 2

Матеріал	Довжина хвилі, нм	ККД, %	Густина потоку енергії, кВт/м ²
GaAs	810	30-53,5	60-430
Si	950	28-60	110

Кремній є дуже поширеною речовиною, і вартість його виробництва низька. Але ефективність передачі енергії через повітря теж низька через чутливість довжини хвилі до атмосферних втрат. GaAs є типовим напівпровідниковим матеріалом III-V групи, хоча він має таку ж кристалічну структуру, як і Si. Однак, на відміну від кремнію, арсенід галію є матеріалом з прямою забороненою зоною і її ширина становить 1,42 еВ, що є оптимальним для перетворення світлової енергії в електричну.

Переваги GaAs матеріалу над Si [16]:

- більший коефіцієнт поглинання світла, тобто швидше поглинає падаюче світло;
- хороша радіаційна стійкість, особливо в аерокосмічній галузі вплив GaAs нижчий, ніж вплив Si;
- високотемпературна стійкість, матеріали GaAs мають нижчий температурний коефіцієнт і можуть адаптуватися до більш високих робочих температур;
- краща ефективність фотоелектричного перетворення, оскільки GaAs має ширшу ширину забороненої зони і краще відповідає сонячному світлу.

Триперехідний ОЕП на основі арсеніду галію, розроблений компанією Spire Semiconductor, досяг пікової ефективності 42,3 % [17]. Одноперехідні фотоелектричні матеріали мають гарні показники ефективності перетворення енергії. Але вони можуть поглинати лише одну певну довжину хвилі і меншу яскравість падаючого світла ніж багатоперехідні матеріали. Це не сприяє зменшенню розміру приймального пристрою. Для підвищення загальної ефективності фотоелектричного перетворення, враховуючи, що різні типи фотоелектричних матеріалів можуть поглинати різну довжину хвилі світла, дослідники комбінують різні елементи III-V колонок періодичної таблиці відповідно до різної ширини забороненої зони, щоб отримати багатоперехідні фотоелектричні матеріали. Такі матеріали можуть поглинати багато різних довжин хвиль, щоб підвищити загальну ефективність перетворення енергії.

гії. У триперехідного фотоелектричного матеріалу InGaP/AsGa/Ga ефективність фотоелектричного перетворення вища, ніж у одноперехідних матеріалів.

У 2006 р. в [24] вивчали характеристики триперехідного фотоелектричного матеріалу InGaP/AsGa/Ga при зміні яскравості падаючого світла і температури. У лабораторії досліджували напругу холостого ходу, струм короткого замикання, коефіцієнт заповнення та ефективність перетворення енергії. Діапазон яскравості падаючого лазерного випромінювання становив від 1 до 200 разів більше сонячного світла, а діапазон температур матеріалу – від 30 до 240 °С. Лабораторні результати показали, що коли температура залишається постійною, зі збільшенням яскравості падаючого лазерного випромінювання, напруга холостого ходу, струм короткого замикання і ефективність перетворення потужності також зростають. Якщо яскравість залишалася постійною, при підвищенні температури напруга холостого ходу, коефіцієнт заповнення і ефективність фотоелектричного перетворення зменшувалися, а струм короткого замикання зростав [24].

У 2008 р. [25] вивчали електричні властивості триперехідних GaAs матеріалів C1MJ і C2MJ в діапазоні температур від ~0 до 120 °С і падаючого світла в діапазоні від 1 до 1000 разів більше сонячного світла. Результат показав, що зі збільшенням яскравості падаючого світла ефективність фотоелектричного перетворення спочатку зростає, а потім падає. Підвищення температури призводить до зниження ефективності фотоелектричного перетворення, а коли температура була постійною, то пік ефективності фотоелектричного перетворення був при 500-кратному перевищенні сонячного світла [25].

У 2010 р. дослідники з Хебейського технологічного університету протестували триперехідний фотоелектричний матеріал GaAs. Експеримент показав, що максимальна ефективність фотоелектричного перетворення склала 22,24 %, а максимальна вихідна потужність – 23,56 Вт за умови 500-кратного освітлення сонячним світлом. Крім того, при підвищенні температури на 1 °С струм короткого замикання зменшився до 1,9 мА [26].

У 2013 р. Шанхайський університет науки і технологій успішно побудував математичну модель матеріалу GaAs з трьома переходами і теоретично проаналізував вплив зміни яскравості падаючого світла та температури, виміряв напругу холостого ходу і ефективність матеріалу. З результатів видно, що збільшення яскравості падаючого світла збільшує напругу холостого ходу та ефективність перетворення. Зі збільшенням температури напруга холостого ходу і ефективність перетворення знижуються [27].

У [28] дослідили, як різні температури впливають на фотоелектричні матеріали GaAs, під час експерименту діапазон температур становив від ~5 до 170 °С. Триперехідні фотоелектричні матеріали GaAs на основі Ga знижують ефективність в умовах високих температур (25+°С), як показано в результаті [28].

В [31] представили одно-фотоелектричний ОЕП з використанням структур $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs, досягнули вражаючого ККД 46 % при лазерному опроміненні 0,5 Вт/см² з довжиною хвилі 850 нм. Продовжуючи цей прогрес, в [32] отримали підвищений показник ККД до 52,1 %, використовуючи $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ з довжиною хвилі 806 нм. Більшість дослідників при розробці ОЕП покладаються на GaAs завдяки надійному виробничому досвіду у фотоелектричній промисловості. Нещодавні звіти показують, що ОЕП в парі з лазерами на довжині хвилі 858 нм досягли значного ККД на рівні 68,9 % [33]. У той же час, поєднання ОЕП з лазерами на довжині хвилі 808 нм призвело до ще більш високого показника ККД – 74,7 % [30]. Крім того, ретельна заміна атомів ґратки на індій дозволяє точно налаштувати ширину забороненої зони відповідно до ближнього інфрачервоного спектру.

У [29] досліджували оптимізацію фотоелектричного матеріалу InGaAs, за допомогою якого можна було досягти ефективності перетворення енергії >50 % при довжині хвилі падаючого лазерного випромінювання 1064 нм. Як наслідок, ОЕП на основі InGaAs продемонстрував ККД в 50,8 % [29].

Також ЛПЕ використовується для бездротової передачі під водою. Для підводного застосувань потрібні синьо-зелені лазери, в яких ширина забороненої зони поглинача повин-

на бути налаштована на $\sim 2,2$ еВ. Хоча GaInP з узгодженою шириною забороненої зони можна отримати епітаксійним вирощуванням і отримати 40 % ККД при довжині хвилі 532 нм [34], його висока виробнича вартість і крихка природа створюють серйозні перешкоди для отримання комерційних підводних ОЕП. У цьому випадку основним кандидатом був би органічно-неорганічний гібридний матеріал перовскіт. За допомогою цього матеріалу можливо регулювати енергетичну смугу відповідно до довжини хвилі підводного лазера, таким чином можна збільшити ефективність поглинання лазерної енергії [34]. В [36] продемонстрували перспективність перовскітних матеріалів для підводної передачі енергії, в яких під дією лазера з довжиною хвилі 532 нм було отримано ККД близько 43,02% [36]. Існують також звіти про застосування органічних елементів для ОЕП, наприклад, органічні лазерні перетворювачі потужності демонструють ефективність 36,2 % для лазерного випромінювання з довжиною хвилі 660 нм і густиною потоку випромінювання $9,5$ мВт/см² і забезпечують бездротову мікропередачу енергії з потужністю 0,5 Вт на відстані двох метрів, з використанням матеріалу PBDB-TF-Vtp-eC9 [37].

Таким чином, завдяки зазначеним вище дослідженням можна переконатися, що матеріал GaAs є частим вибором серед фотоелектричних матеріалів для передачі енергії. Він має найвищу ефективність фотоелектричного перетворення на даний час, має невеликий розмір пристрою та зручне застосування. Більше того, багатоперехідний матеріал GaAs може адаптуватися до багатохвильового лазерного випромінювання, тим самим зменшуючи вимоги до випромінювача і підвищуючи енергоефективність.

Досягнуті результати

На шляху розвитку ЛПЕ було багато перепон, але і було чи мало досягнуто значного прогресу за підтримки науково-дослідних робіт, таких як розробка вискоелективних лазерів, збагачення теорії передачі енергії та розробка пристроїв, що приймають енергію. Як результат, ефективність передачі енергії в бездротових системах з часом значно покращилася.

У [21] використали Nd:YAG з довжиною хвилі 532 нм і вихідною потужністю 5 Вт для керування невеликим автомобілем, оснащеним матеріалом InGaP. Відстань передачі становила 300 м, а ефективність перетворення енергії фотоелектричного матеріалу – 25 %. В японському університеті Кінкі використали вихідну потужність оптичного випромінювача 200 Вт з довжиною хвилі 808 нм для опромінювання фотоелектричних матеріалів на машині для польотів повітряних приладів. Фотоелектричні матеріали були виготовлені з восьми фотоелектричних батарей GaAs площею 28 см² кожна. Максимальна вихідна потужність становила близько 42 Вт, а ефективність перетворення падаючих фотонів в електрони становила 21 % [22]. NASA встановило фотоелектричні матеріали на основі кремнію для живлення та керування прототипу альпініста, використовуючи систему телескопів для передачі безперервного лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1030 нм і потужністю 8 кВт. Фотоелектричний масив, який складався з 333 монокристалічних кремнієвих чіпів площею 1 м². Використання кремнієвих концентраторів з лазером 1030 нм виявилось ефективним, досягнувши ефективності 35 % для окремих елементів, хоча остаточна конструкція масиву працювала погано [23].

У 2019 р. у Військово-морській лабораторії США провели другий етап проекту "Power Transmitted Over Laser" (PTROL) на військово-морській експериментальній базі в штаті Меріленд. Під час експериментів було передано 2 кВт лазерної потужності на відстань 325 м, в результаті було отримано близько 400 Вт електричної потужності [38].

У 2021 р. шведська телекомунікаційна компанія Ericsson та американська компанія PowerLig Aerospace успішно продемонстрували повністю бездротову базову станцію 5G з використанням лазерної технології PowerLig Aerospace для передачі 100 Вт потужності на відстань 300 м. Обидві компанії назвали цю демонстрацію важливою віхою на шляху до кінцевої мети передачі кіловат енергії на великі відстані. Демонструючи, як можна розподіляти енергію бездротовим способом, щоб забезпечити розгортання мережі та варіанти викорис-

тання, PowerLig Aerospace Technologies of America заявила, що технологія лазерної бездротової зарядки задовольняє потребу в швидкому живленні бездротових базових станцій для розгортання в надзвичайних ситуаціях [39].

У 2022 р. DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) США опублікувало запит на інформацію щодо модифікації літаків-заправників для підзарядки дронів. Ідея полягає в тому, щоб розробити капсулу під назвою "бортова енергетична свердловина", яку можна було б встановити під крилами діючих літаків-заправників ВПС США, таких як KC-135 і KC-46, для бездротової зарядки БПЛА за допомогою лазера. Капсула потребуватиме потужності лазера щонайменше 100 кВт і відповідної системи терморегуляції. DARPA вважає, що "повітряні енергетичні свердловини" можуть стати частиною енергетичної мережі, яка дозволить Міністерству оборони динамічно розподіляти енергетичні ресурси для забезпечення більшої гнучкості військових операцій [40].

Однією з найважливіших сфер застосування ЛПЕ виявилися космічні сонячні енергетичні супутники/станції (SSPS) [41]. Ці системи використовують геостаціонарні супутники на навколосезній орбіті (ГСО) для збору і перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Зібрана енергія потім трансформується і передається до визначеного місця прийому на Землі за допомогою мікрохвильового або лазерного випромінювання. У порівнянні з традиційними фотоелектричними джерелами живлення, система SSPS дозволяє отримувати енергію в режимі 24/7, будучи при цьому географічно незалежною. Таким чином, її завершення забезпечить значну кількість енергії на планеті, тим самим пом'якшивши зростаючу енергетичну кризу.

На додаток до SSPS, ще одним важливим застосуванням ЛПЕ є лазерна передача енергії для дослідницьких апаратів на поверхнях планет [42]. Малим космічним апаратам або наземним засобам пошуку корисних копалин може бути важко генерувати достатньо енергії для роботи потужних радіостанцій і приладів корисного навантаження, які можуть знадобитися для завершення майбутніх місій. Малі супутники і наземні марсоходи можуть потребувати нетрадиційного способу виробництва енергії під час сонячних затемнень або під час роботи в затінених ділянках поверхні планети. Для вирішення цієї проблеми супутник, що знаходиться в полі зору Сонця, використовується як ретрансляційна станція для бездротової підзарядки енергії для цих посадкових пристроїв [43].

Лазер може передавати промінь безпосередньо в точне місце, що забезпечує мобільність і простоту базової станції та безперервну передачу енергії. Марсохід може безперервно працювати в кратерах і на зворотному боці Місяця. Сучасні місяцеходи та марсоходи використовують радіоізотопний термоелектричний генератор (RTG) для підзарядки енергії. Однак, через обмежені розміри марсоходів, малі RTG не можуть задовольнити довгострокові потреби у підзарядці енергії [44]. Крім того, використання ракет для перевезення великої кількості радіоізотопів є дуже ризикованим. Тому використання систем SSPS для передачі накопиченої енергії сонячного світла за допомогою лазерів для бездротової підзарядки марсохода має значний потенціал у місячному або марсіанському середовищі.

Висновки

Зроблено загальний огляд розвитку системи ЛПЕ. Дослідження систем ЛПЕ мають величезне значення для майбутнього енергетичної галузі, і очікується, що вони не тільки змінять наявні методи передавання, а й розширять відповідні сфери застосування, бездротових технологій. Хоча концепція бездротової лазерної передачі енергії була запропонована ще в 1960-х роках, ЛПЕ все ще знаходиться на початковій стадії, оскільки показники кожного модуля ЛПЕ стримуються його технічними обмеженнями. В даний час технологія ЛПЕ в основному спрямована на потреби військових та космічних застосувань. До них належать живлення супутників, передача енергії для планетарних роверів і аварійна підзарядка безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Проаналізовано аспекти лазерного випромінювача, фотоелектричних матеріалів та їх ефективність перетворення енергії. Технологія БПЕ на основі лазера має невеликий розмір, простий у реалізації та використанні, має значне вирівнювання променя і високу ефективність перетворення фотоелектричної енергії. Точність, стабільність і типи хвиль впливають на ефективність роботи системи ЛПЕ, що може бути одним з напрямків підвищення ефективності. На ефективність лазерної передачі сильно впливає середовище передачі; ефективність передачі у вакуумі і в повітрі або воді дуже відрізняється і в кінцевому підсумку впливає на розподіл інтенсивності випромінювання на приймальному кінці. Незважаючи на найбільш оптимізовані конструкції ЛПЕ, на поточному етапі ефективність повної системи ЛПЕ досягає лише близько 20 – 25 %. Таким чином, дослідження слід зосередити на розвитку та оптимізації окремих модулів для підвищення ефективності всієї ланки ЛПЕ.

Слід зазначити, якщо одного лазера недостатньо для задоволення потреби в енергії, можна розглянути можливість використання діодної лазерної системи. Проте такий підхід ускладнить виготовлення випромінювального пристрою, що призведе до значного підвищення ціни. Інший спосіб досягнення кращої продуктивності лазерних випромінювачів це підвищенні ефективності променя накачування. Можна цього досягти за допомогою джерела накачування. Крім того, можна вжити заходів для зменшення дефектів в епітаксійних кристалах, таких як підвищення чистоти сировини, поліпшення якості кристалічної ґратки, епітаксійних структур і більш точний контроль товщини і концентрації легування. Ці стратегії допомагають покращити якість кристалів і потужність лазера. Слід також зазначити, що ефективність лазерного перетворення чутлива до температури [24 – 28], і велика кількість тепловиділення є неминучим наслідком роботи потужних лазерів. Для забезпечення оптимального температурного контролю лазера важливо використовувати вискоелективні охолоджувачі і корпуси з високим коефіцієнтом теплопередачі. Ці методи сприяють підвищенню ефективності лазерної передачі і прокладають шлях для подальших досліджень і розробок в галузі ЛПЕ.

Для підвищення ефективності прийому лазерного випромінювання необхідно використовувати вискоелективні ОЕП, адаптовані до довжини хвилі лазера; ОЕП працюють за принципом, подібним до фотоелектричних пристроїв, але вони перетворюють енергію конкретно на цільовій довжині хвилі лазера. Щоб підвищити ефективність перетворювача лазерного випромінювання на одній довжині хвилі, можна використовувати дизайн мікропорожнин для оптимізації діелектричної проникності на довжині хвилі лазера [12 – 14].

Іншим важливим фактором є вибір матеріалу відповідно до середовища, в якому використовується ЛПЕ. Наприклад, у космосі ОЕП виготовлені з GaAs, є більш придатними, ніж ОЕП, виготовлені з матеріалів Si. У підводному середовищі з низькою щільністю окрім GaInP, також можна використовувати гібридні халькогенідні матеріали на основі органічних і неорганічних сполу [33 – 36]. Проте в багатьох дослідженнях використовуються матеріали на основі GaAs, тому цей матеріал є одним з найпоширеніших для поглинання оптичного [43 – 33].

Таким чином, ЛПЕ є перспективною технологією для бездротової передачі енергії, яка може застосовуватися як у військовому, так і в цивільному секторах. Через технічні обмеження окремих модулів, ефективність повної системи ЛПЕ становить лише 20 – 25 %. Проте, завдяки подальшим дослідженням в галузі лазерів і ЛПЕ, очікується, що в недалекому майбутньому ефективність повного каналу ЛПЕ перевищить 30 %.

Список літератури:

1. Electrodynamic Approach to Designing WPT Systems with Accounting for Non-system Interactions / A.I. Luchaninov, D.V. Gretskih, A.V. Gomozov, V.A. Katrich, M.V. Nesterenko // IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2019. 2019. P. 80–85.
2. Modeling the WPT system with the multistate transmitting subsystem / D. Gretskih, A. Luchaninov, A. Gomozov, V. Katrich, M. Nesterenko // Proceedings of the 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. 2020. P. 110–115.

3. Xu W., Wang X., Li W., Li S., Lu C. Research on test and evaluation method of laser wireless power transmission system // *Eurasip Journal Advances Signal Processing*. 2022. Vol. 2022 (1). P. 1–10.
4. Rohner M., Wagner L. Fiber-coupled high-power diode-lasers with highest radiance // *Proceedings of the 2013 High Power Diode Lasers and Systems Conference, HPD*. 2013. P. 36–39.
5. McCormick D., Irwin D., Stapleton D. Ultra-narrow spectral linewidth diode lasers for the pumping of alkalis // *Proceedings of the 2015 High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD)*. 2015. P. 25–26.
6. Huang R. K., Samson B., Chann B. Recent progress on high-brightness kw-class direct diode lasers // *Proceedings of the 2015 High Power Diode Lasers and Systems Conference, HPD*. 2015. P. 29–30.
7. Kleine K., Balu P. High-power diode laser sources for materials processing // *High Power Diode Las.* 2017. P. 3–4.
8. Dong J., Zhang J., Yang X., Pan W., Cui S. High order cascaded Raman random fiber laser with high spectral purity // *Opt. Express*. 2018. Vol. 26 (5). P. 5275–5280.
9. Krasnoshchoka A., Xu J., Thorseth A., Thorseth A. High luminous flux laser lighting using single-crystal Ce, YAG phosphor // *Proceedings of the 2019 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference, HPD*. 2019. P. 31–32.
10. Wang Y., Wu J., Zhao O. Single-frequency DBR Nd-doped fiber laser at 1120 nm with a narrow linewidth and low threshold // *Opt. Lett.* 2020. Vol. 45 (8). P. 2263–2266.
11. Nadimi M., Onyenekwu C., Major A. Continuous-wave dual-wavelength operation of the in-band diode-pumped Nd, GdVO₄/Nd, YVO₄ composite laser with controllable spectral power ratio // *Appl. Phys. B*. 2020. Vol. 126 (5). P. 75.
12. Pan G., Xun M., Zhao Z. High slope efficiency bipolar cascade 905 nm vertical cavity surface emitting laser // *IEEE Electron. Dev. Lett.* 2021. Vol. 42 (9). P. 1342–1345.
13. Fei Y.Z., Li Y., Tang Z.T. High-power, multi-junction, 905 nm vertical-cavity surface-emitting laser with an AlGaAsSb electron-blocking layer // *Opt. Lett.* 2023. Vol. 48 (8). P. 2142–2145.
14. Alvarez J., Pimienta J., Mercado E., Sarmiento R. An extended laser cavity centered at 780 nm for high-resolution laser spectroscopy applications // *Las. Phys.* 2023. Vol. 33 (5). P. 550.
15. Liu Y., Yang G., Zhao Y. 48 W continuous-wave output from a high-efficiency single emitter laser diode at 915 nm // *IEEE Photonic Tech. L.* 2022. Vol. 34 (22). P. 1218–1221.
16. Han M. Research on photoelectric conversion efficiency of GaAs concentrated cell under laser irradiation: dissertation. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD201901&filename=1019800556.nh&uniplatform=NZKPT&v=sFiHMT7eJYbThD4O4CbBMLIncq0HXdeU9F7R2QzvnVxHVzXWYMSpjhuYNccxBuo3>
17. King R. R., Bhusari D., Larrabee D., Liu X.-Q. Solar cell generations over 40% efficiency // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2012. Vol. 20 (6). P. 801–815.
18. Ermer J., Jones K. R., Hebert P., Pien P. Status of C3MJ+ and C4MJ production concentrator solar cells at Spectrolab // 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2011. P. 941.
19. Miyazawa K., Watanabe Y. Shiseido develops innovative technology to convert ultraviolet light into light that brings about beneficial effects on the skin // Shiseido Company. 2024. URL: <https://corp.shiseido.com/en/news/detail.html?n=00000000003256>
20. Carroll D. A brighter idea: Wake Forest receives patent for new fiber solar cells // *Wake Forest News*. 2010. URL: <https://news.wfu.edu/2010/04/08/a-brighter-idea-wake-forest-receives-patent-for-new-fiber-solar-cells/> / Steinsiek F., Foth W. P., Weber K. H. Wireless power transmission experiment as an early contribution to planetary exploration mission // *Proceedings of the 54th International Astronautical Congress*. 2003. P. 169–176.
21. Kawashima N., Takeda K., Yabe K. Application of the laser energy transmission technology to drive a small airplane // *Chinese Optics Letters*. 2007. Vol. 5 (101). P. 109–110.
22. Becker D. E., Chiang R., Keys C. C. Photovoltaic concentrator-based power beaming for space elevator application // *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2010. Vol. 1230 (1). P. 271–281.
23. Nishioka K., Takamoto T., Agui T., Kaneiwa M., Uraoka Y., Fuyuki T. Annual output estimation of concentrator photovoltaic systems using high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2006. Vol. 90 (1). P. 57–67.
24. Kinsey G. S., Hebert P., Barbour K. E., Krut D. D., Cotal H. L., Sherif R. A. Concentrator multijunction solar cell characteristics under variable intensity and temperature // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2008. Vol. 16 (6). P. 503–508.
25. Nishioka K., Sueto T., Uchina M., Ota Y. Detailed analysis of temperature characteristics of an InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell // *Journal of Electronic Materials*. 2010. Vol. 39 (6). P. 704–708.
26. Wang Z., Zhang H., Liu Y. Theoretical and experimental analysis of electrical characteristics of InGaP/GaAs/Ge three-junction GaAs photovoltaic cells // *Proceedings of the CSEE*. 2013. Vol. 33 (27). P. 168–174.
27. Zimmermann S., Helmers H., Tiwari M. K., Paredes S. A high-efficiency hybrid high-concentration photovoltaic system // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 89. P. 514–521.
28. Kalyuzhnyy N. A., Emelyanov V. M., Evstropov V. V., Mintairov S. A. Optimization of photoelectric parameters of InGaAs metamorphic laser ($\lambda = 1064$ nm) power converters with over 50% efficiency // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2020. Vol. 217. P. 100–107.

29. Fafard S., Masson D. P. 74.7 % efficient GaAs-based laser power converters at 808 nm at 150 K // *Photonics*. 2022. Vol. 9 (8). P. 579.
30. Merz J. L., Logan R. A., McBride P. L., Sergent A. M. GaAs double-heterostructure photodetectors // *Journal of Applied Physics*. 1977. Vol. 48 (8). P. 3580–3587.
31. Olsen L. C., Huber D. A., Dunham G., Addis F. W. High-efficiency monochromatic GaAs solar cells // *The Conference Record of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 1991. P. 419–424.
32. Helmers H., Lopez E., Hohn O., Lackner D. 68.9% efficient GaAs-based photonic power conversion enabled by photon recycling and optical resonance // *Rapid Research Letters*. 2021. Vol. 15 (7). P. 2100113.
33. Steinsiek F. Wireless power transmission experiment as an early contribution to planetary exploration missions // *International Astronautical Congress*. 2003. P. 169–176.
34. Li Q., Zheng Y., Guo X., Zhang G., Ding G. Interface engineering enhances the photovoltaic performance of wide bandgap FAPbBr₃ perovskite for application in low-light environments // *Adv. Funct. Mater.* 2023. Vol. 33 (40). P. 1–23.
35. Guo X., Chen X., Li Q., Zhang G., Ding G., Li F. High-efficiency widebandgap perovskite solar cells for laser energy transfer underwater // *Energy Technology*. 2023. Vol. 11 (7).
36. Wang Y., Zheng Z., Wang J., Bi P., Chen Z. Organic laser power converter for efficient wireless micro power transfer // *Nature Commun.* 2023. Vol. 14 (1). P. 5511.
37. Cavallaro E. Researchers transmit energy with laser in historic power-beaming demonstration // U.S. Naval Research Laboratory. URL: <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/2504007/researchers-transmit-energy-with-laser-in-historic-power-beaming-demonstration/>
38. Irving M. Wireless power transmission tech demo uses lasers to run 5G station // *New Atlas*. URL: <https://newatlas.com/energy/wireless-power-transmission-ericsson-powerlight>
39. Uppal R. DARPA Airborne Energy Well seeks laser propulsion on Aircrafts to power Rechargeable Unmanned Aerial Systems – International Defense Security & Technology // *International Defense Security & Technology*. URL: <https://idstch.com/military/air/darpa-airborne-energy-well-seeks-laser-propulsion-on-aircrafts-to-power-rechargeable-unmanned-aerial-systems/>
40. Cavallaro E. Researchers transmit energy with laser in ‘historic’ power-beaming demonstration // U.S. Naval Research Laboratory. URL: <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/2504007/researchers-transmit-energy-with-laser-in-historic-power-beaming-demonstration/>
41. Abdullah S., Mulles P. J. S., Amaya R. E. A new adaptive wireless power transfer solution for use with space rovers and vehicles // *2022 IEEE international conference on wireless for space and extreme environments (wisee)*. 2022. P. 49–54.
42. Sanders M., Kang J. S. Utilization of Polychromatic Laser System for Satellite Power Beaming // *2020 IEEE Aerospace Conference, Big Sky*. 2020. P. 1–7.
43. Kerslake T. W., El-Genk M. S. Lunar Surface-to-Surface Power Transfer, *AIP Conf. Proc.* 964. 2008. P. 466–473.

Надійшла до редколегії 18.01.2025

Відомості про авторів:

Сокіркасв Денис Вадимович – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки; Україна; e-mail: denys.sokirkaiev@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4659-529X>

Зарудний Олександр Андрійович – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем; Україна; e-mail: oleksandr.zarudnyi@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1612-0256>