DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.05.093>
УДК 502.174.3

Є.С. Чернозьомов, аспірант

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15
тел. 0938575836; e-mail: werytist@gmail.com

Модель поляризації випромінювання в системі сонячного енергетичного концентратора

Розглянуто можливість застосування поновлюваних джерел енергії для виробництва водневого палива, зокрема сонячної променевої енергії без використання стадії генерації електроенергії. Наведено математичну модель відбивача з анізотропією електродинамічних властивостей. На основі проведеного аналізу з використанням описаної моделі зроблено висновки про можливість застосування цього ефекту для забезпечення пропускну здатності енергетичної складової сонячного випромінювання з частковим або повним збереженням поляризації. Запропоновано варіанти колімуючих оптичних систем енергетичних концентраторів, потенційно здатних реалізувати процес фотолізу.

К л ю ч о в і с л о в а: водневе паливо, квазірезонансна частота, фотоліз, фотосинтез, поляризація випромінювання, оптична анізотропія, кут Брюстера, нормальний кут падіння, ковзаючий кут падіння.

Водень є екологічно чистим і найенергоємнішим паливом, проте наразі не існує ефективного способу отримання водню. На його виробництво зазвичай витрачається більше енергії, ніж можна отримати згодом від нього. Актуальним завданням є використання енергії для виробництва водню, отриманої за допомогою поновлюваних джерел енергії (ПДЕ), таких як вітроенергетика або сонячна променева енергія. Варто зауважити, що при цьому вирішуються проблеми транспортування і зберігання енергії у вигляді водневого палива.

Існує декілька способів отримання водню з води, серед яких найперспективнішим вважається електроліз. Застосування електролізу в комплексі з ПДЕ передбачає дві стадії: генерація електроенергії і виробництво водню. Однак при цьому вже на першій стадії виникають проблеми з ефективністю. Слід зазначити, що використання вітряних генераторів

© Чернозьомов Є.С., 2021

рів відповідає саме такій концепції. Сонячна енергетика дозволяє минути стадію генерації електроенергії та перейти відразу до виробництва водню за засобами фотолізу.

Відомо, що при дії прямих сонячних променів фотоліз при фотосинтезі інтенсивніший, що обумовлено властивостями поляризації випромінювання сонця. Поляризація містить інформацію квазірезонансної частоти водню, яка з'являється в результаті народження електромагнітного випромінювання в процесі ділення атомів водню на сонці.

Квазірезонансна частота водню значно покращує фотоліз води при фотосинтезі через придання атомам водню додаткової енергії, внаслідок чого молекула води стає нестабільною і розпадається, викидаючи кисень в атмосферу, а водень використовується для виробництва органічних речовин. Тут варто зазначити, що при віддзеркаленні від звичайного дзеркала випромінювання змінює поляризацію, через що ця складова може бути повністю або частково втрачена. Якщо збільшити щільність сонячного енергетичного потоку за допомогою оптичної концентрації і забезпечити при цьому збереження поляризації сонячного випромінювання, можна побудувати ефективну установку для виробництва водню [1].

Пристрій для концентрації і передачі сонячного випромінювання (рис.1) має оптичну систему, що складається з трьох асферичних дзеркал. Вона формує колімірований світловий пучок підвищеної енергетичної щільності для подачі його в хвилевід. По хвилеводу високопотенційний потік подається безпосередньо до стаціонарного приймача (пристрою фотолізу). Проте при забезпеченні пропускної спроможності енергетичної складової необхідно враховувати залежність енергетичних ефектів від інтенсивності випромінювання, оскільки при віддзеркаленні підвищеної енергетичної щільності оптичні елементи супроводжуються дуже помітними термодинамічними явищами, які можуть привести не лише до їх нагріву, а і викликати теплове руйнування [2].

Аналіз публікацій. Згідно звіту BNEF [3], в якому надано глобальний незалежний аналіз і перспективи водневої економіки, ціна виробництва водню за допомогою ПДЕ буде знижуватись, що обумовлено розвитком водневої інфраструктури і способів його виробництва.

В Інституті сонячних досліджень Німецького аерокосмічного центру DLR побудовано систему Synlight, яку називають найбільшим штучним сонцем на планеті [4]. Система Synlight має розміри триповерхової будівлі і складається із 149 прожекторів, випромінюючих світло з інтенсивністю в 10 000 разів більше, ніж сонячне випромінювання. Прожектори установки Synlight аналогічні тим, що зазвичай використовуються в кінопроекторах із ксеноновими лампами. Світло від прожекторів сконцент-

роване на площі розміром 20см^2 . При цьому температура у фокусі може досягати 3000°C , чого вистачає для виробництва водневого палива.

У Нідерландах компаніями BayWa r.e. і Alliander реалізовано спільний проект, в якому електролізери використовують електроенергію фотоелектричних панелей для генерації водню [5].

Ізраїльський інститут Weizmann Institute of Science в 2005 р. випробував технологію отримання водню за допомогою сонячної вежі. Оксид цинку у присутності деревного вугілля нагрівався дзеркалами до температури 1200°C . В результаті процесу отримано чистий цинк, який можна герметично упакувати і транспортувати до місць виробництва водню. На місці цинк розміщують у воді і в результаті хімічної реакції отримують водень і оксид цинку, який можна ще раз помістити в сонячну вежу і отримати чистий цинк. Технологія пройшла випробування в сонячній вежі канадського інституту Institute for the Energies and Applied Research [6].

Швейцарська компанія Clean Hydrogen Producers (CHP) розробила технологію виробництва водню з води за допомогою параболічних сонячних концентраторів. Загальна площа дзеркал станції складає 93 м^2 . Вода починає розділятися на водень і кисень при температурі більше 1700°C . За світловий день 6,5 год установка CHP може розділяти на водень і кисень 94,9 л води. Виробництво водню складе 3800 кг в рік (близько 10,4 кг в день) [6].

Як бачимо, існує тенденція використання сонячної енергії для генерації водню як з наявністю стадії отримання електроенергії, так і без неї. Варто зазначити, що існують безліч патентів, в яких використано резонансну частоту водню для збільшення ККД електролізерів. Проте в існуючих наразі сонячних установках не використовується квазірезонансна частота водню, яка вже міститься в поляризації сонячного випромінювання.

Результати дослідження. Електромагнітне випромінювання описується електричним $\mathbf{E}$ і магнітним $\mathbf{H}$ векторами. Оскільки усі електрохімічні реакції при дії випромінювання залежать від електричного вектора $\mathbf{E}$, прийнято брати до уваги тільки його. Характер його просторової спрямованості визначає поляризацію випромінювання. Сонячне світло можна розглядати як випромінювання кругової поляризації (рис. 2, *а*) або неполяризоване випромінювання (рис. 2, *б*), вектор $\mathbf{E}$ якого у момент зустрічі з віддзеркалювальною поверхнею може бути спрямований у будь-яку сторону (*c*-поляризація).

По здатності віддзеркалення у випромінюванні *c*-поляризації можна виділити паралельну і перпендикулярну складові, тобто коли вектор $\mathbf{E}$ спрямований перпендикулярно до площини падіння, — *s*-поляризація (рис. 3, *а*), коли паралельно, — *p*-поляризація (рис. 3, *б*).

Рис. 1. Пристрій для концентрації і передачі сонячного випромінювання

Рис. 2. Випромінювання s -поляризації: a — кругова поляризація; b — неполяризоване випромінювання

Рис. 3. Плоскополяризоване випромінювання: a — s -поляризація; b — p -поляризація

Рис. 4. Коефіцієнти віддзеркалення R залежно від кута падіння φ для різних поляризацій: a — для діелектриків; b — для металів [7]

Відбиваючу здатність для s - і p -поляризацій описують формули Френеля, за якими побудовано графіки на рис. 4, які свідчать, що p складова поляризації відбивається гірше. Найбільше поглинання цієї складової відбувається при куті Брюстера, тому цей кут ще називають кутом повної поляризації.

Існують дзеркала, здатні відбивати випромінювання великої потужності (близько 10 МВт/см^2), але це можливо тільки у випадку, якщо випромінювання має s -поляризацію. Такі дзеркала використовуються для фокусування і управління лазерним променем. При віддзеркаленні p -поляризованого випромінювання віддзеркалювальна поверхня сильніше нагрівається і при енергетичній щільності близько 10 КВт/см^2 (на три порядки менше) нагрів може перевищувати температуру плавлення майже будь-якого металу, що робить неможливим створення сонячних енергетичних концентраторів з високим коефіцієнтом концентрації.

При віддзеркаленні світлове випромінювання розділяється на відбитий і заломлений промені. Нагрів віддзеркалювальної поверхні відбувається внаслідок поглинання енергії заломленого променя. Кут, за яким поширюється заломлений промінь, обчислюється за формулою Снеліуса, енергетичний розподіл між відбитим і заломленим променями описують формули Френеля (див. рис. 4).

Діелектрики можуть бути прозорими, і тоді заломлений промінь можна спостерігати візуально. Прозорих металів не існує, заломлений промінь в них поглинається миттєво, проте формули Френеля і Снеліуса справедливі і для металів. Характеристики відбитого променя від металів

Рис. 5. Умови максимального прояву ефекту кута Брюстера

подібні до таких, начебто заломлений промінь існував. Тому в розрахунках для поглинаючих середовищ показник заломлення і кут заломлення прийнято вважати комплексними величинами.

Ефект кута Брюстера максимально проявляється при куті 90° між заломленим і відбитим променями (рис. 5). При віддзеркаленні від ізотропних середовищ (звичайне дзеркало) заломлений промінь один. В анізотропному середовищі він роздвоюється (подвійне променезаломлення), розділяючись на s - і p -поляризовані заломлені промені (рис. 6). При подвійному променезаломленні один промінь називається звичайним (має s -поляризацію, заломлюється, як в ізотропних середовищах), другий — незвичайним (має p -поляризацію, залежить від напрямку коливання електронів відносно кута падіння). За будовою кристалічної решітки анізотропні кристали поділяються на позитивні і негативні. В позитивних p -поляризований промінь заломлюється сильніше, ніж s -поляризований, в негативних навпаки. Отже, кут Брюстера для цих поляризацій при відбиванні від анізотропних кристалів буде різним.

Таким чином, модифікуючи кристалічну структуру віддзеркалювальної поверхні, можна змістити кут Брюстера для p -поляризації (рис. 7): для позитивно структурованих — праворуч $R^{(P)A+}$, для негативно структурованих — ліворуч $R^{(P)A-}$. В результаті можна збільшити коефіцієнт віддзеркалення p -компоненти неполяризованого сонячного випромінювання для кутів в області нормального падіння або кутів поблизу ковзаючого падіння.

Згідно з визначенням Максвелла—Лоренца змінне електричне поле світлових хвиль приводить до коливань електронів, що містяться в ньому і пов'язані з атомами пружними силами. Електрони, що коливаються, індукують вторинні електромагнітні хвилі — відбите світло [8].

Моделлю анізотропного середовища є система, що складається з витягнутих молекул або інших комплексів, в яких оптичні електрони можуть здійснювати коливання переважно уздовж одного вибраного напрямку. Це зумовлює залежність здатності віддзеркалення від кута падіння при зміні кута відносно напрямку коливання електронів (рис. 8). В анізотропних середовищах має значення також поляризація (напрямок прикладених сил до цього коливання), що вносить різницю показників заломлення n для s - і p -поляризацій.

Рис. 6. Віддзеркалення і заломлення для анізотропних середовищ: *a* — позитивні кристали; *б* — негативні кристали; штриховою стрілкою позначено кут падіння відносно *p*-поляризованого заломленого променя, якби випромінювання віддзеркалювалось від ізотропної поверхні

Рис. 7. Коефіцієнти віддзеркалення R залежно від кута падіння φ : *a* — видимий спектр; *б* — ІЧ-спектр в області 5мкм; для анізотропного середовища $R^{(P)A+}$ — позитивно структуровані; $R^{(P)A-}$ — негативно структуровані; $R^{(P)}$ і $R^{(S)}$ — коефіцієнти віддзеркалення для *s*- і *p*-поляризованої хвилі від ізотропного середовища

Рис. 8. Віддзеркалення і поглинання випромінювання від анізотропного середовища залежно від кута падіння

У роботі [9] це пояснюється так. Якщо поляризація світлової хвилі, що падає, співпадає з напрямом коливання електронів, то світлове поле викликає значне розгойдування електронів, передає їм свою енергію, а вони, у свою чергу, передають енергію кристалічній решітці. В результаті світлова хвиля поглинається. Якщо ж поляризація хвилі, що падає, перпендикулярна напрямку можливого руху електронів в кристалі, то коливання електронів практично не збуджуються або електрони коливаються з невеликою амплітудою, віддаючи свою енергію вторинному випромінюванню, а не решітці кристала. В цьому випадку хвиля повністю відбивається.

Рівняння руху осцилюючого електрона описує модель Лоренца:

$$\ddot{x} + \Gamma \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{e}{m} (\mathbf{f}, \mathbf{E}), \quad (1)$$

де x — величина зміщення електрона відносно положення рівноваги; Γ — коефіцієнт загасання коливань; e і m — заряд і маса електрона; ω_0 — власна частота коливань елементарного осцилятора; $(\mathbf{f}, \mathbf{E})$ — скалярний добуток векторів, рівний проекції вектора $\mathbf{E}$ на напрям $\mathbf{f}$. Враховуючи (1), поляризацію одиниці об'єму провідника $\mathbf{P} = e\mathbf{f}xN$ запишемо у вигляді

$$\mathbf{P} = \frac{Ne^2}{m} \frac{(\mathbf{f}, \mathbf{E})}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma} \mathbf{f}, \quad (2)$$

де N — число молекул в одиниці об'єму; $\mathbf{f}$ — вектор напрямку руху електронів.

Розглянемо скалярний добуток

$$(\mathbf{f}, \mathbf{E}) = f_1 E_1 + f_2 E_2 + f_3 E_3, \quad (3)$$

де f_1, f_2, f_3 — компоненти одиничного вектора $\mathbf{f}$; E_1, E_2, E_3 — компоненти вектора $\mathbf{E}$ в декартовій системі координат x_1, x_2, x_3 . Підставивши (3) в (2), отримаємо систему рівнянь декартових компонент P_1, P_2, P_3 вектора $\mathbf{P}$:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{Ne^2}{m} \frac{f_1 f_1 E_1 + f_1 f_2 E_2 + f_1 f_3 E_3}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma}, \\ P_2 &= \frac{Ne^2}{m} \frac{f_2 f_1 E_1 + f_2 f_2 E_2 + f_2 f_3 E_3}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma}, \\ P_3 &= \frac{Ne^2}{m} \frac{f_3 f_1 E_1 + f_3 f_2 E_2 + f_3 f_3 E_3}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тензорний зв'язок між компонентами P_i і E_i свідчить про те, що зміщення електронів в анізотропному середовищі відбувається не у напрямі поля світлової хвилі, як це відбувається в ізотропних середовищах, а в напрямі, визначеному структурою кристала [9]. Тому вектори електричної індукції $\mathbf{D}$ і напруженості $\mathbf{E}$ в анізотропному середовищі не паралельні, як вектор Пойнтинга $\mathbf{S}$ та хвильовий вектор $\mathbf{k}$. При цьому кут між цими векторами, $\mathbf{D}$ і $\mathbf{E}$, $\mathbf{S}$ і $\mathbf{k}$, однаковий і дорівнює різниці кута падіння відносно нормалі коливання електронів.

З матеріальних рівнянь отримуємо

$$\begin{aligned} D_1 &= \varepsilon_1 \varepsilon_1 E_1 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 E_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 E_3, \\ D_2 &= \varepsilon_2 \varepsilon_1 E_1 + \varepsilon_2 \varepsilon_2 E_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 E_3, \\ D_3 &= \varepsilon_3 \varepsilon_1 E_1 + \varepsilon_3 \varepsilon_2 E_2 + \varepsilon_3 \varepsilon_3 E_3, \end{aligned} \quad (5)$$

де D_1, D_2, D_3 — компоненти вектора $\mathbf{D}$; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ — тензорні компоненти діелектричної проникності ε . Із формул (5) видно, що діелектрична проникність збільшується при збільшенні поляризованості молекули і зменшенні електричної індукції. При збільшенні кута падіння для негативних кристалів вона зменшується, а для позитивних збільшується (див. рис.8).

Показник заломлення n для анізотропного середовища запишемо у вигляді

$$n_1 = \sqrt{\varepsilon_1 \mu}, \quad n_2 = \sqrt{\varepsilon_2 \mu}, \quad n_3 = \sqrt{\varepsilon_3 \mu}, \quad (6)$$

де μ — магнітна проникність середовища (для більшості матеріалів $\mu = 1$). Для металів показник заломлення і діелектрична проникність є комплексними величинами, беручи до уваги, що $\varepsilon \mathbf{E} = \mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P}$. Тоді з формули (2) випливає

$$\varepsilon = 1 - \frac{4\pi N e^2}{m (\omega^2 + i\Gamma\omega)},$$

звідки видно, що діелектрична проникність для металів може набувати значень менше одиниці і навіть менше нуля [10].

Отже, при будь-якому куті падіння можна обрати такий кут відносно напрямку коливання електронів, при якому показник заломлення (6) буде мінімальним, що дозволить (при ковзаючому падінні) створити ефект повного віддзеркалення на межі з щільнішими середовищами. Це забезпечить можливість роботи оптичних елементів (апертурний стрижень) в щільних енергетичних полях. На рис. 8 схематично показані особливості впливу напрямку коливання електронів відносно кута падіння на відбиваючі здібності. На рис. 8, а, показано, що усе випромінювання поглинається, а при зміні кута падіння на 90° від цієї ж поверхні відбивається усе випромінювання, що падає.

Відомо, що при віддзеркаленні випромінювання міняє свою поляризацію. Нехай γ_s і γ_p — фази, ρ_s і ρ_p — абсолютні значення коефіцієнтів віддзеркалення, пов'язані наступними співвідношеннями:

$$\frac{R_p}{A_p} = \rho_p \exp(i\gamma_p), \quad \frac{R_s}{A_s} = \rho_s \exp(i\gamma_s),$$

де коефіцієнти віддзеркалення R_p , R_s і амплітуди хвиль A_p , A_s , що падають, отримуємо за формулами Френеля:

$$R_p = \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \varphi_t)}{\operatorname{tg}(\varphi + \varphi_t)} A_p, \quad R_s = -\frac{\sin(\varphi - \varphi_t)}{\sin(\varphi + \varphi_t)} A_s.$$

Азимутний кут α_r зсуву амплітуд s - і p -поляризацій для відбитого світла [10]:

$$\operatorname{tg} \alpha_r = \frac{R_s}{R_p} = -\frac{\cos(\varphi - \varphi_t)}{\cos(\varphi + \varphi_t)} \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \psi e^{-i\Delta} \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\rho_s}{\rho_p}, \quad \Delta = \gamma_p - \gamma_s,$$

де φ — кут падіння; φ_t — комплексний кут заломлення; $\operatorname{tg} \alpha$ — кут зсуву амплітуд поляризацій хвилі, що падає; Δ — зсув фаз поляризації; $\operatorname{tg} \psi$ — зміна стану поляризації відбитого випромінювання.

Зауважимо, що величина α_r дійсна в двох випадках:

1. При нормальному падінні ($\varphi = 0$); тоді $\operatorname{tg} \psi = 1$ і $\Delta = -\pi$, так що $\operatorname{tg} \alpha_r = -\operatorname{tg} \alpha$.
2. При ковзаючому падінні ($\varphi = \pi/2$); тоді $\operatorname{tg} \psi = 1$ і $\Delta = 0$, так що $\operatorname{tg} \alpha_r = \operatorname{tg} \alpha$.

У випадку 1 немає різниці між s - і p -поляризаціями фаз, чим обумовлено збереження поляризації відбитого випромінювання в цій області кутів падіння. На рис. 9 видно, що зміни стану поляризації не відбу-

вається до $\varphi < 15^\circ$, що зумовлено «заваленими» фронтами світлової хвилі. При подальшому збільшенні кута падіння зміна поляризації починає плавно збільшуватися, досягаючи мак-

Рис. 9. Графік зміни стану поляризації світла залежно від кута падіння [10]

Рис. 10. Концентратор-коліматор на основі апертурного стрижня (а) і кути падіння випромінювання (б) на оптичні елементи, які працюють в щільних енергетичних полях

симуму в області кута Брюстера (штрихова лінія). Наближаючись до кута ковзання ($\varphi = 90^\circ = \pi/2$), зміна поляризації знову починає зменшуватися. Це пов'язано з критичним кутом, при якому s - і p -поляризації відбиваються в те ж саме середовище, з якого падали. Варто зазначити, що зрушення кута Брюстера спричинить зміщення кривої на рис. 9 по осі абсцис, що допоможе збільшити інтервал збереження поляризації відбитого випромінювання в області нормального або ковзаючого кутів падіння.

На рис. 10 і 11 показано оптичні системи концентраторів-коліматорів з різними способами формування високопотенційного пучка. В цих системах оптичні елементи, які працюють в щільних енергетичних полях, опромінюються при кутах поблизу ковзаючого падіння (див. рис. 10) або при кутах в області нормального падіння (див. рис. 11). Це свідчить про те, що обидві оптичні системи здатні зберегти поляризацію сонячного випромінювання. Як видно на рис. 9, в області нормального падіння спостерігається більший інтервал збереження поляризації відбитого випромінювання. Це дає змогу зробити висновок, що оптична система на основі гіперболоїда (див. рис. 11) краще збереже поляризацію при концентрації.

Концентратор-коліматор на основі гіперболоїда [11] має дзеркало прийому сонячного випромінювання параболічної форми, яке збирає промені у фокусі, поєднаному з одним з фокусів двопорожнинного гіперболоїда, який є фігурою кінцевого перерізу як парабола або еліпс. Гіперболоїд має унікальні оптичні властивості: якщо промені падають в один з фокусів, то відбиваються від першої порожнини в його протилежний фокус. Потрапивши на другу порожнину, вони відбиваються назад в пер-

Рис. 11. Концентратор-коліматор на основі гіперboloїда (а) і кути падіння випромінювання (б) на оптичні елементи, які працюють в щільних енергетичних полях

ший фокус. З кожним віддзеркаленням промені, які потрапили в систему гіперboloїда, все більше співпадають з віссю оптичної системи концентратора. Так відбувається доти, поки усі промені не утворять односпрямований пучок, який співпадає з віссю. В центрі одної з порожнин гіперboloїда є отвір для виведення сконцентрованого односпрямованого світлового пучка для подачі його в хвилевід.

Варто зауважити, що в системі, зображеній на рис. 10, можливість роботи оптичних елементів в щільних енергетичних полях забезпечується через падіння променів в області кутів ковзання ($\varphi = \pi/2$), що допомагає створити ефект повного віддзеркалення. У системі, зображеній на рис. 11, в щільних енергетичних полях переважають кути поблизу нормального падіння. При цьому в системі гіперboloїда при збільшенні щільності випромінювання кут падіння наближається до нормального ($\varphi = 0$).

Тут варто зазначити, що нагрів оптичних елементів здебільшого відбувається на частотах інфрачервоного (ІЧ) випромінювання. Поблизу кутів нормального падіння в цій області спектра металеві дзеркала мають практично 100%-ний коефіцієнт віддзеркалення як для s - так і для p -поляризації (див. рис. 7, б). Для ІЧ спектра більш справедливий закон Хагена—Рубенса [7]. Через частотну дисперсію показник заломлення зменшується і кут Брюстера зміщується в область кутів ковзання, що сприяє не лише збільшенню коефіцієнта R , а і збереженню поляризації при кутах нормального падіння. Треба зазначити також, що структуруючи віддзеркалювальну поверхню за типом позитивно анізотропного кристала (див. рис. 7, б, $R^{(P)A+}$), можна отримати зміщення кута Брюстера в область ковзаючого падіння, що допоможе збільшити інтервал збереження поляризації в області нормальних кутів.

Висновки

Збільшення відбиваючої здатності для p -компоненти поляризації через зміщення кута Брюстера з області робочих кутів допоможе забезпечити пропускну спроможність енергетичної складової неполяризованого сонячного випромінювання, що зробить можливим створення оптичних систем концентраторів сонячної енергії з високим коефіцієнтом концентрації.

Використання ефекту анізотропії електродинамічних властивостей дзеркал концентратора допоможе забезпечити допустимі теплові режими оптичних елементів, які працюють в щільних полях енергії сонячного випромінювання.

Запропоновані варіанти колімуючих оптичних систем енергетичних концентраторів потенційно здатні реалізувати процес фотолізу за допомогою створення щільного енергетичного потоку сонячного випромінювання зі збереженням квазірезонансної частоти водню, що забезпечить процес розкладання води в цьому полі випромінювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент на винахід 120802, Україна, МПК (2020.01) F24S 10/00, G02B 6/00, F24S 20/20 (2018.01), F24S 23/00. Пристрій для концентрації і передачі сонячного випромінювання / Чернозьомов Є.С. № а 2018 06907; заяв. 20.06.2018; опубл. 10.02.2020, Бюл. № 3.
2. Чернозьомов Є.С. Моделі енергетичного розподілу на межі розділу середовищ в щільних енергетичних полях системи сонячного концентратора// Електрон. моделювання, 2020, **42**, №6, с. 34—55.
3. Hydrogen Economy Outlook. Key messages March 30, 2020. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://about.bnef.com/blog/hydrogen-economy-offers-promising-path-to-decarbonization/> (Дата звернення: 08.04.21).
4. Frank Jordans. Let there be light: German scientists test ‘artificial sun’. AP News March 23, 2017. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://apnews.com/article/science-cologne-ap-top-news-climate-germany-096b20f71b154209bec823006c616b35> (Дата звернення: 08.04.21).
5. Energias Renovables. Renovables:la vacuna. Diciembre 2020. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://www.energias-renovables.com/panorama/anuario-2020-renovables-la-vacuna-20201214> (Дата звернення: 08.04.21).
6. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В. В. Водород в энергетике / Учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014, 229 с.
7. Абильситов Г.А., Голубев В.С., Гонтарь В.Г. и др. Технологические лазеры. Справочник в двух томах. Т. 1: Расчет, проектирование и эксплуатация. / Под общ. ред. Г.А. Абильситова. М.: Машиностроение, 1991, 432 с.
8. Шубников А.В. Основы оптической кристаллографии. / Под ред. Е.Б. Кузнецова. М.: Изд. АН СССР, 1958, 201 с.
9. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика / Учебник. 2-е изд. М.: Изд. МГУ; Наука, 2004, 656 с.

10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е. / Под ред. Н.А. Райской. М.: Изд-во Наука, 1973, 719 с.
11. Заявка на винахід № 2021 04519, Україна. Концентратор-коліматор сонячного випромінювання на основі гіперболоїда / Чернозьомов Є.С. Вх. № 135242; 04.08.2021.

Отримано 21.04.2021
після доопрацювання 14.07.2021

REFERENCES

1. Chernozomov, E.S. (2018), Patent for invention 120802, Ukraine, IPC (2020.01) F24S 10/00, G02B 6/00, F24S 20/20 (2018.01), F24S 23/00 “Device for concentration and transmission of solar radiation”, № a 2018 06907; application date June 20, 2018, publication date February 10, 2020; Bulletin no. 3.
2. Chernozomov, E.S. (2020), “Models of energy distribution at the interface of media in dense energy fields of a solar concentrator system”, *Elektronne modelyuvannya*, Vol. 42, no. 6, p. 34-55.
3. Hydrogen Economy Outlook. Key messages of March 30, 2020, available at: <https://about.bnef.com/blog/hydrogen-economy-offers-promising-path-to-decarbonization/> (accessed: April 08, 2021).
4. Jordans, F. (2017), “Let there be light: German scientists test ‘artificial sun’ ”, *AP News*, available at: <https://apnews.com/article/science-cologne-ap-top-news-climate-germany-096b20f71b154209bec823006c616b35> (accessed: April 08, 2021).
5. Renewable Energies. Renewables: the vaccine. December 2020, available at: <https://www.energias-renovables.com/panorama/anuario-2020-renovables-la-vacuna-20201214> (accessed: April 08, 2021).
6. Radchenko, R.V., Mokrushin, A.S. and Tulpa, V.V. (2014), *Vodorod v energetike* [Hydrogen in power engineering], Izdatelstvo Uralskogo universiteta, Yekaterinburg, Russia.
7. Abilsitov, G.A., Golubev, V.S., Gontar, V.G. and others (1991), *Tekhnologicheskiye lazery. Spravochnik v dvukh tomakh. T. 1: Raschet, proyektirovaniye i ekspluatatsiya* [Technological lasers. Handbook in 2 volumes. Vol. 1: Calculation, design and operation], Mashinostroyeniye, Moscow, USSR.
8. Shubnikov, A.V. (1958), *Osnovy opticheskoy kristallografii* [Fundamentals of optical crystallography], AN USSR, Moscow, USSR.
9. Akhmanov, S.A. and Nikitin, S.Yu. (2004), *Fizicheskaya optika* [Physical optics], Nauka, Moscow, Russia.
10. Born, M. and Wolf, E. (1973), *Osnovy optiki* [Fundamentals of optics], Translated by Rayskaya, T.A., Nauka, Moscow, USSR.
11. Chernozomov, E.S. (2021), Application for the invention № a 2021 04519, “Concentrator-collimator of solar radiation based on hyperboloid”, Entrance № 135242; April 08, 2021, Ukraine.

Received 21.04.2021
after revision 14.07.2021

Y.S. Chernozomov

POLARIZATION MODELS OF RADIATION
IN A SOLAR ENERGY CONCENTRATOR SYSTEM

The possibility of using renewable energy sources (RES) for the production of hydrogen fuel, in particular solar radiation energy, without using the stage of generating electricity is considered. A mathematical model of a reflector with anisotropy of electrodynamic properties is presented. According to the analysis, using the described model, conclusions were drawn about the possibility of using this effect to ensure the transmission capacity of the energy component of solar radiation with partial or complete retention of polarization. Based on the data obtained, variants of collimating optical systems of energy concentrators are proposed that are potentially capable of realizing the photolysis process.

Keywords: hydrogen fuel, quasi — resonance frequency, photolysis, photosynthesis, radiation polarization, optical anisotropy, Brewster angle, normal angle of incidence, grazing angle.

ЧЕРНОЗЬОМОВ Євген Сергійович, аспірант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 2018 р. закінчив Східноукраїнський національний університет ім. В.І. Даля (м. Сєвєродонецьк). Область наукових досліджень — засоби ефективного використання джерел поновлюваної енергії, аналітичні системи моделювання.