



Огляд

<https://doi.org/10.26565/2075-3810-2020-43-14>

УДК 535.214

ДІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

## ВПЛИВ КОМПОНЕНТ ОПТИЧНОГО ІМПУЛЬСУ ТА СПІНУ ЕВАНЕСЦЕНТНИХ ХВИЛЬ НА МІКРО- ТА НАНООБ'ЄКТИ (ОГЛЯД)

О.В. Ангельський<sup>1,2</sup>, К.Ю. Зенкова<sup>2</sup>, Д.І. Іванський<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Науково-дослідний інститут Тайчжоу університету Джейян, шосе Джеда, 38, Ханчжоу, провінція  
Джейян, 310027, Китай

<sup>2</sup>Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія  
Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58012, Україна

e-mail: [idmitrow@gmail.com](mailto:idmitrow@gmail.com)

Надійшла до редакції 10 листопада 2019 р.

Прийнята 7 травня 2020 р.

**Актуальність.** Механічні властивості світла знаходять широке застосування в прикладних сферах, таких, як оптичне захоплення та маніпулювання, сортування, деформування біологічних клітин та молекул. В загальному випадку, в еванесцентному полі можуть виникати три компоненти оптичного імпульсу та спінового кутового моменту (спіну), що при взаємодії з об'єктами проявляються у виникненні відповідної компоненти оптичної сили та обертового моменту. Такі неординарні властивості еванесцентних хвиль відкривають нові можливості для маніпулювання мікро- та нанооб'єктами, в порівнянні з класичними оптичними пінцетами та маніпуляторами, що може бути застосовано для розв'язання прикладних задач, зокрема, біомедицини.

**Мета роботи.** Метою роботи є аналіз та узагальнення останніх досліджень стосовно механічного впливу з боку еванесцентного поля на мікро- та нанооб'єкти, зокрема, пов'язаного із впливом поперечних компонент оптичного імпульсу та спіну.

**Матеріали і методи.** Метод імпульсів дозволяє виділити в еванесцентному полі дію на частинки оптичних сил та обертових моментів, пов'язаних із компонентами оптичного імпульсу та кутового моменту, різної природи та напрямку дії, в залежності від поляризації падаючої хвилі. Експериментальні методики маніпулювання частинками в ближньому полі дозволяють візуалізувати такий вплив, що робить його можливим для застосування в прикладних задачах.

**Результати.** Нещодавні дослідження демонструють вплив на нано- та мікрооб'єкти таких «незвичайних» компонент оптичного імпульсу та спіну, як поперечний спіновий імпульс, поперечний спін, поперечна уявна компонента оптичного імпульсу та вертикальний спін. Пропонується застосування, зокрема, останніх, для розв'язання прикладних задач біомедицини, таких, як транспортування терапевтичних агентів в патологічні ділянки чи відновлення прохідності судин та кровопостачання тканин.

**Висновки.** Отримані результати теоретичного та експериментального дослідження механічної дії компонент оптичного імпульсу та спіну еванесцентного поля дозволяють розширити підходи оптичного маніпулювання мікро- та нанооб'єктами, з можливістю прикладних застосувань, зокрема, в задачах біомедицини.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** еванесцентна хвиля; оптичний імпульс; спін; оптична сила; обертовий момент; наночастинка.

## INFLUENCE OF COMPONENTS OF OPTICAL MOMENTUM AND SPIN OF EVANESCENT WAVES ON MICRO- AND NANOOBJECTS (REVIEW)

O.V. Angelsky<sup>1,2</sup>, C.Yu. Zenkova<sup>2</sup>, D.I. Ivanskyi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Taizhou Research Institute of Zhejiang University, 38 Zheda Road, Hangzhou, Zhejiang Province, 310027, China

<sup>2</sup>Institute of Applied-Physics and Computer Sciences, Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University,  
2 Kotsyubynsky Str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

**Background:** Mechanical properties of light are widely used in applied areas, such as optical trapping and manipulation, sorting, deformation of biological cells and molecules. In general, the evanescent field may exhibit three components of optical momentum and spin angular momentum (spin), which manifest themselves in the occurrence of corresponding components of optical force and torque. Such extraordinary properties of evanescent waves open up new possibilities for manipulating of micro- and

nanoobjects, in comparing with classical optical tweezers and manipulators, which can be used for solving the applied problems, in particular, of biomedicine.

**Objectives:** Aim of this work is to analyze and summarize recent studies regarding to the mechanical influence of evanescent field on micro- and nanoobjects, in particular, related to the influence of transverse components of optical momentum and spin.

**Materials and methods:** Method of momenta allows one to distinguish in an evanescent field the action of optical forces and torques, associated with the components of optical momentum and angular momentum of different nature and action direction, depending on the polarization of the incident wave. Experimental methods of particle manipulation in the near field allow visualizing such an influence, which makes it possible for solving the applied problems.

**Results:** Recent studies demonstrate the action on nano- and microobjects of such "extraordinary" optical momentum and spin components, as transverse spin momentum, transverse spin, transverse imaginary optical momentum component, and vertical spin. Using, in particular, the latter, to solve the applied problems of biomedicine is proposed, such as transporting of therapeutic agents to pathological areas or restoring vascular patency and tissue blood supply.

**Conclusions:** Obtained results of theoretical and experimental investigation of the mechanical action of the optical momentum and spin components of evanescent field allow us to extend the approaches of optical manipulation of micro- and nanoobjects, with the possibility of applications, in particular, for the problems of biomedicine.

**KEY WORDS:** evanescent wave; optical momentum; spin; optical force; torque; nanoparticle.

## ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТ ОПТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА И СПИНА ЭВАНЕСЦЕНТНЫХ ВОЛН НА МИКРО- И НАНООБЪЕКТЫ (ОБЗОР)

О.В. Ангельский<sup>1,2</sup>, К. Ю. Зенкова<sup>2</sup>, Д.И. Иванский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт Тайчжоу университета Джэйянг, шоссе Джеда, 38, Ханчжоу, провинция Джэйянг, 310027, Китай

<sup>2</sup>Институт физико-технических и компьютерных наук, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина

**Актуальность.** Механические свойства света находят широкое применение в прикладных сферах, таких, как оптический захват и манипулирование, сортировка, деформирование биологических клеток и молекул. В общем случае, в эванесцентном поле могут возникать три компонента оптического импульса и спинового углового момента (спина), что при взаимодействии с объектами проявляется в возникновении соответствующей компоненты оптической силы и крутящего момента. Такие неординарные свойства эванесцентных волн открывают новые возможности для манипулирования микро- и нанообъектами, по сравнению с классическими оптическими пинцетами и манипуляторами, что может быть применено для решения прикладных задач, в частности, биомедицины.

**Цель работы.** Целью работы является анализ и обобщение последних исследований по механическому воздействию со стороны эванесцентного поля на микро- и нанообъекты, в частности, связанного с влиянием поперечных компонент оптического импульса и спина.

**Материалы и методы.** Метод импульсов позволяет выделить в эванесцентном поле воздействие на частицы оптических сил и вращательных моментов, связанных с компонентами оптического импульса и углового момента различной природы и направления действия, в зависимости от поляризации падающей волны. Экспериментальные методики манипулирования частицами в ближнем поле позволяют визуализировать такое влияние, что делает его возможным для применений в прикладных задачах.

**Результаты.** Последние исследования демонстрируют влияние на нано- и микрообъекты таких «необычных» компонент оптического импульса и спина, как поперечный спиновый импульс, поперечный спин, поперечная мнимая компонента оптического импульса и вертикальный спин. Предлагается применение, в частности, последних, для решения прикладных задач биомедицины, таких, как транспортировка терапевтических агентов в патологические участки или восстановления проходимости сосудов и кровоснабжение тканей.

**Выводы.** Полученные результаты теоретического и экспериментального исследования механического воздействия компонент оптического импульса и спина эванесцентного поля позволяют расширить подходы оптического манипулирования микро- и нанообъектами, с возможностью прикладных применений, в частности, в задачах биомедицины.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** эванесцентная волна; оптический импульс; спин; оптическая сила; крутящий момент; наночастица.

Ще у перших роботах Пойнтінга зазначається, що світло володіє лінійним імпульсом та кутовим моментом [1, 2, 9]. Здатність світла створювати механічний вплив на об'єкти вперше була використана А. Ешкінім в 1970 р. для створення оптичних пінцетів [3], за що ним у 2018 р. було отримано Нобелівську премію. Механічні властивості світла знаходять широке застосування в прикладних сферах, таких, як оптичне захоплення та маніпулювання мікро- та наночастинками, сортування, деформування біологічних клітин та молекул [4]. Принцип дії сучасних оптичних пінцетів базується на використанні складного просторово-неоднорідного розподілу інтенсивності, поляризації та фази [4, 14–16]. Відновлення, зокрема фазового розподілу оптичного поля є доволі складною задачею, що вирішується підходами сингулярної оптики [5–7]. В рамках даних підходів демонструється здатність світла маніпулювати об'єктами різної форми та різноманітних властивостей, розмірами в декілька нанометрів, мікрон [4, 14].

Нещодавні роботи демонструють, що структуровані, неоднорідні оптичні поля, такі як еванесцентні хвилі, володіють досить нетривіальною структурою розподілу поляризаційно-залежних та поляризаційно-незалежних компонент оптичного імпульсу та спіну [9]. Нещодавно було передбачено існування «незвичайних» поперечних компонент оптичного імпульсу та спіну еванесцентних хвиль, ортогональних до напрямку поширення та дії світлового тиску [8–12]. Лінійний імпульс та кутовий оптичний момент при взаємодії з частинками стає причиною виникнення тої чи іншої компоненти оптичної сили та обертового моменту. Найбільш повний аналіз та класифікацію оптичних сил та обертових моментів, пов'язаних з динамічними характеристиками еванесцентного поля, наводиться в [9]. Вплив тої чи іншої компоненти оптичної сили та обертового моменту задається не тільки поляризацією падаючого пучка, але й значною мірою залежить від типу частинок та відповідного наближення для опису взаємодії поля з частинкою [9].

При взаємодії з частинками в еванесцентному полі, в загальному випадку, можуть виникати три компоненти оптичної сили та обертового моменту [9, 12]. Деякі з них, наприклад, градієнтна сила у вертикальному напрямку або поздовжня сила тиску, що пов'язані з дійсною та уявною компонентами орбітального імпульсу, є досить добре вивченими та використовуються для розв'язання прикладних задач [4, 9]. Нещодавно було експериментально спостережено дію поперечної компоненти оптичної сили, ортогональної до напрямку світлового тиску, зумовленої поперечним спіновим імпульсом, що виникає у випадку збудження еванесцентного поля циркулярно поляризованою падаючою хвилею [11]. Еванесцентна хвиля володіє поперечним спіновим кутовим моментом (поперечним спіном), що виникає навіть при збудженні її лінійно поляризованою падаючою хвилею, створюючи обертовий момент частинки в площині падіння [9]. За умови реалізації еванесцентного поля при повному внутрішньому відбиванні (ПВВ) лінійно поляризованої падаючої хвилі з азимутом  $\pm 45^\circ$  також виникає поперечна уявна компонента оптичного імпульсу, що асоціюється з уявною частиною вектора Пойнтінга, та відображає потік так званої «накопиченої» енергії [9, 10, 12, 13]. В цьому випадку також виникає вертикальна компонента спінового кутового моменту (вертикальний спін) еванесцентного поля в напрямку, ортогональному до поверхні поділу, де реалізується ПВВ, що зумовлює дію обертового моменту на частинки в площині, паралельній до цієї поверхні (в горизонтальній площині) [9, 12]. Такі неординарні властивості еванесцентних хвиль розширюють, в порівнянні з класичними оптичними пінцетами, можливості оптичного маніпулювання та керування рухом мікро- та нанооб'єктів, із застосуванням такого впливу для розв'язання прикладних задач, зокрема, біомедицини [4, 52, 56–62].

### СТРУКТУРА ЕВАНЕСЦЕНТНОГО ПОЛЯ ПРИ ЯВИЩІ ПВВ

Еванесцентна хвиля є прикладом *структурованого* оптичного поля [14], яке характеризується неоднорідним розподілом інтенсивності та наявністю еліптичної поляризації, що може існувати у різних площинах в залежності від умов збудження [9, 20, 21]. Одним з методів генерації еванесцентної хвилі є явище повного внутрішнього відбивання (ПВВ) на плоскій межі поділу двох діелектричних середовищ з різними показниками заломлення ( $n_2 < n_1$ ), при кутах падіння, більших за *граничний* [17–19]. Еванесцентна хвиля виникає в середовищі з меншим показником заломлення та характеризується комплексним значенням хвильового вектора, дійсна частина якого описує поширення хвилі в поздовжньому ( $z$ -) напрямку, а уявна задає затухання хвилі по амплітуді у вертикальному напрямку  $x$ , ортогональному до межі поділу [17]. Поверхні рівних фаз та рівних амплітуд еванесцентної хвилі є взаємно перпендикулярними, тому така хвиля є неоднорідною [17]. Область, на яку еванесцентна хвиля проникає в середовище, визначається так званою *глибиною проникнення*, що залежить від співвідношення показників заломлення, довжини хвилі та кута падіння [19].

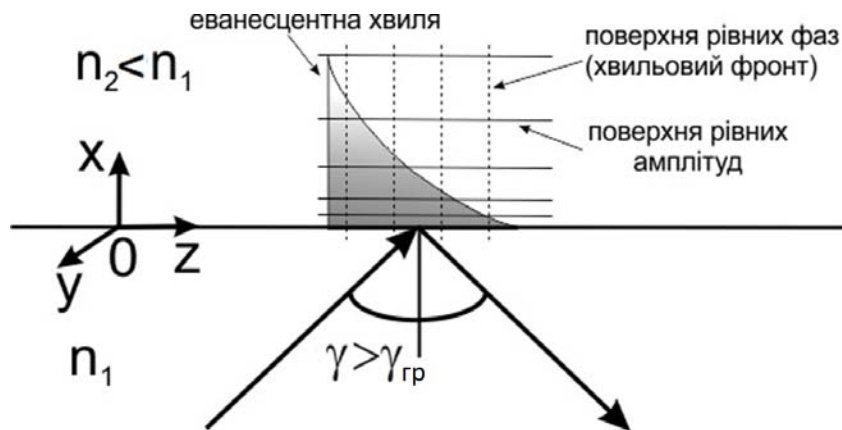


Рис. 1. Еванесцентна хвиля при ПВВ на плоскій межі поділу ( $n_1 > n_2$ ) [17]:  $\gamma$  — кут падіння на межу поділу;  $\gamma_{\text{гр}}$  — граничний кут падіння;  $n_1, n_2$  — показники заломлення відповідно першого та другого середовищ.

Вектор напруженості електричного поля еванесцентної хвилі, що виникає над межею поділу, може бути представлений у вигляді [9, 49]:

$$\vec{E}_{\text{ев}} = E \left( \vec{x} \frac{1}{\sqrt{1+|m|^2}} + \vec{y} \frac{m}{\sqrt{1+|m|^2}} \frac{k}{k_z} + \vec{z} (-i) \frac{1}{\sqrt{1+|m|^2}} \frac{\kappa}{k_z} \right) e^{ik_z z - \kappa x} e^{-i\omega t}, \quad (1)$$

де  $E = k_z / k \sqrt{\frac{\mu_1}{\mu_2}} T E_1$  — амплітуда електричного поля еванесцентної хвилі;  $E_1$  —

амплітуда падаючої хвилі;  $k$  — хвильове число;  $k_z = k \frac{n_1}{n_2} \sin \gamma$ ,  $\kappa = k \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \gamma - 1}$  — дійсна та уявна складові хвильового вектора;  $\gamma$  — кут падіння падаючої хвилі на

межу поділу;  $T = \frac{\sqrt{|T_{//}|^2 + |m_1|^2 |T_{\perp}|^2}}{\sqrt{1+|m_1|^2}} \exp[i \arg T_{//}]$  — коефіцієнт пропускання;  $T_{//}$ ,  $T_{\perp}$  —

френелівські коефіцієнти пропускання;  $m = \frac{T_{\perp}}{T_{//}} m_1$  — комплексний поляризаційний параметр, що описує поляризацію еванесцентної хвилі;  $m_1$  — поляризаційний параметр відповідно падаючої хвилі;  $\mu_1, \mu_2$  — магнітні проникності першого та другого середовища відповідно;  $n_1, n_2$  — показники заломлення першого та другого середовища відповідно;  $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ ,  $x, z$  — орти координатних осей та значення координат

в декартовій системі координат;  $i$  — уявна одиниця;  $\omega$  — циклічна частота;  $t$  — час.

На відміну від поширюваних хвиль еванесцентна хвиля не є поперечною оскільки містить поздовжню (уявну) компоненту поля. Наявність уявної одиниці у виразі для амплітуди поздовжньої компоненти поля задає фазовий зсув величиною  $\pi/2$  по відношенню до двох інших поперечних компонент. Це спричиняє обертання електричного вектора еванесцентної хвилі в площині, що збігається з площиною падіння (так звана *ефективна еліптична поляризація*), на відміну від звичайної циркулярно- чи еліптично-поляризованої хвилі, де обертання здійснюється в поперечній площині [9]. При цьому еліптичність поляризації еванесцентної хвилі виникає навіть у випадку лінійної поляризації падаючої хвилі (Рис. 2) [20]. Поляризація еванесцентних хвиль була виміряна експериментально [20, 21].

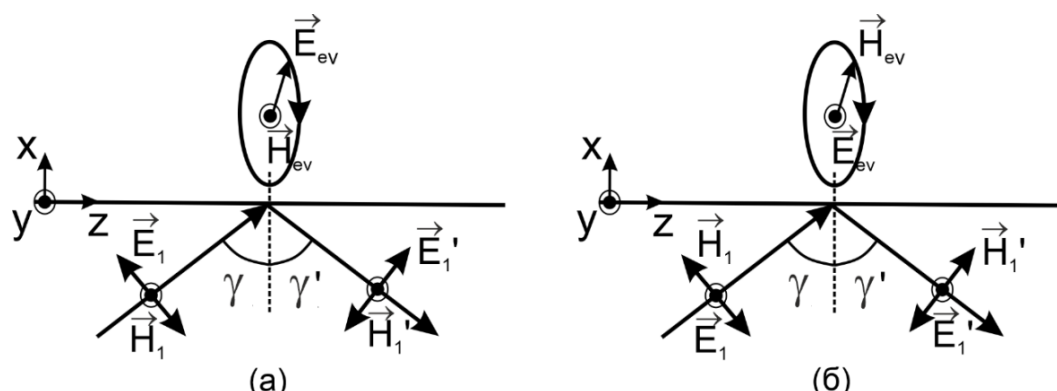


Рис. 2. Поляризація еванесцентної хвилі у випадку р- (а) та s- (б) поляризації падаючої хвилі [20]:

$\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}'_1$ ,  $\vec{E}_{ev}$ ,  $\vec{H}_1$ ,  $\vec{H}'_1$ ,  $\vec{H}_{ev}$  — вектори напруженості електричного та магнітного полів падаючої, відбитої та еванесцентної хвилі відповідно;  $\gamma$ ,  $\gamma'$  — кути падіння та відбивання.

Наявність неоднорідного просторового розподілу інтенсивності та еліптичної поляризації еванесцентних хвиль, що, в загальному випадку може існувати в різних площинах, в залежності від поляризації падаючої хвилі, створюють умови для виникнення «незвичайних» компонент оптичного імпульсу та спіну, в порівнянні з поширюваними хвилями [9].

### ОПТИЧНИЙ ІМПУЛЬС ТА СПІН ЕВАНЕСЦЕНТНИХ ХВИЛЬ

Динамічні характеристики еванесцентного поля, такі, як густина імпульсу чи спіну, мають складну структуру розподілу, що залежить від поляризації падаючого пучка [9, 12]. Густина орбітального імпульсу еванесцентного поля може бути задана, як [9, 49]:

$$p_o = p_{oz} = \frac{A^2}{8\pi\omega} \left( k_z + \frac{m^2 k^2}{k_z} + \frac{\kappa^2}{k_z} \right) \exp(-2\kappa x), \quad (2)$$

де  $A = \frac{E}{\sqrt{1+|m|^2}}$ . Орбітальний імпульс напрямлений у поздовжньому  $z$ -напрямку та задає дію сили тиску в еванесцентному полі.

Густина спінового імпульсу  $\vec{p}_s$  містить як поздовжню компоненту, що напрямлена протилежно до  $z$ -напрямку [9, 49]:

$$p_{sz} = -\frac{A^2}{4\pi\omega} \frac{\kappa^2}{k_z} \exp(-2\kappa x), \quad (3)$$

так і поперечну компоненту в  $y$ -напрямку [9, 11, 49]:

$$p_{sy} = \frac{A^2}{4\pi\omega} \frac{\kappa k}{k_z} \text{Im } m \exp(-2\kappa x). \quad (4)$$

Спіновий кутовий момент (спін) еванесцентного поля виникає внаслідок циркуляції густини спінового імпульсу  $\vec{s} = \nabla \times \vec{p}_s$ , що може відбуватись в різних

площинах, в залежності від поляризації падаючої хвилі [9, 10, 12].

Умови виникнення відповідних компонент оптичного імпульсу та спіну еванесцентного поля найбільш повно описуються в [9, 10, 12], з чого можна зробити наступні висновки:

- 1) Оптичний імпульс еванесцентного поля можна розкласти на спінову та орбітальну складові. При цьому орбітальний (канонічний) імпульс еванесцентної хвилі має тільки поздовжню  $z$ -компоненту, в той час, як спіновий імпульс характеризується як поздовжньою (напрявленою протилежно до напрямку орбітального імпульсу), так і поперечною компонентою. Поздовжня компонента спінового імпульсу, як і орбітальний імпульс, існують за будь-якої поляризації падаючої хвилі, в той час, як поперечна компонента спінового імпульсу визначається еліптичністю поляризації [9];
- 2) Спіновий кутовий момент (спін) еванесцентного поля характеризується поздовжньою  $z$ -, поперечною  $y$ - та вертикальною  $x$ -компонентою; при цьому, поздовжній спін, як і для класичного випадку, пропорційний ступеню циркулярної поляризації падаючої хвилі, в той час, як поперечна компонента спіну є поляризаційно-незалежною, та виникає навіть у випадку збудження еванесцентної хвилі лінійно поляризованою падаючою хвилею. Причина виникнення такої «незвичайної» компоненти спінового кутового моменту полягає у наявності еліптичної поляризації еванесцентної хвилі, яка виникає у площині падіння [19]. У випадку лінійної поляризації падаючої хвилі з азимутом  $\pm 45^\circ$  для спінового кутового моменту виникають «вертикальні» компоненти в  $x$ -напрямку, що утворюються внаслідок обертання векторів електричного та магнітного поля при проекції на горизонтальну площину  $yOz$  (Рис. 3.) [9]. Електрична та магнітна складові вертикального спіну є протилежно напрямленими; однак при взаємодії поля з речовиною переважний вплив здійснюватимуть характеристики поля, що визначаються його електричною складовою, тому при взаємодії еванесцентного поля з частинками електрична складова вертикального спіну буде породжувати відповідний обертальний момент [9, 10].
- 3) Густина імпульсу еванесцентного поля можна розкласти на дійсну та уявну частини; при цьому, дійсна частина імпульсу поля, що містить спінову та орбітальну складові, асоціюється з дійсним значенням вектора Умова-Пойнтінга, а уявна частина ( $y$ -компонента) задає потік, так званої, «накопиченої» енергії [9, 10, 12, 13]. Уявна частина густини імпульсу еванесцентного поля містить вертикальну  $x$ - та поперечну  $y$ -компоненти. Вертикальна компонента уявного імпульсу (уявна частина орбітального імпульсу) при взаємодії з частинками формує градієнтну силу, що діє в  $x$ -напрямку, в той час, як поперечна компонента виникає при лінійній поляризації з азимутом  $\pm 45^\circ$  та задаватиме поперечну поляризаційно-залежну силу [9].

Таким чином в еванесцентному полі може виникати три різні компоненти густини імпульсу поля та три компоненти спінового кутового моменту (спіну) в залежності від поляризації падаючого пучка [9] (Рис. 3). При взаємодії еванесцентного поля з частинками, наявність тої чи іншої компоненти густини імпульсу чи спіну буде породжувати відповідну оптичну силу та обертальний момент, що діятимуть на частинку. В [9] зазначається, що вплив на частинки таких характеристик поля, як поперечної дійсної (спінової) та уявної компоненти оптичного імпульсу, поперечного та вертикального спінового кутового моменту є недостатньо вивченими. Нещодавні роботи демонструють результати теоретичних та експериментальних досліджень саме такого впливу [9–12, 36, 49–52, 56, 57].

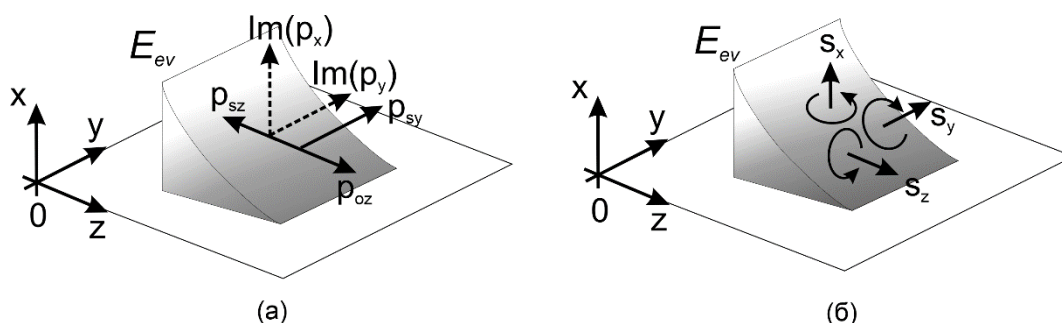


Рис. 3. Компоненти оптичного імпульсу (а) та спіну (б) еванесцентної хвилі [9]:  $p_{oz}$  — поздовжня компонента орбітального імпульсу;  $p_{sz}$ ,  $p_{sy}$  — поздовжня та поперечна компоненти спінового імпульсу;  $Im(p_x)$ ,  $Im(p_y)$  — вертикальна та поперечна компоненти уявного імпульсу;  $s_x$ ,  $s_y$ ,  $s_z$  — вертикальна, поперечна та поздовжня компоненти спіну відповідно;  $E_{ev}$  — амплітуда електричного поля еванесцентної хвилі.

### ДІЯ ОПТИЧНИХ СИЛ ТА ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ НА ОБ'ЄКТИ В ЕВАНЕСЦЕНТНОМУ ПОЛІ

Для створення теоретичних моделей розрахунку оптичних сил, що діють на частинки в еванесцентному полі [40–46], дослідження яких починається з 1995 року, обирали діелектричні сфери [23, 24], частинки Мі [25], магнітно-діелектричні частинки [26]. Для металічних частинок теоретичний аналіз наводиться в [27–29]; також існує певний набір робіт, де наводяться результати досліджень впливу оптичних сил на металічні частинки в плазмонних оптичних пінцетах та маніпуляторах [30–33].

Для опису взаємодії поля з частинками з можливістю розрахунку оптичних сил використовуються різні підходи: електромагнітний підхід [4, 23, 25, 28, 47], дипольне наближення [9, 42], наближення Мі [9, 25, 42], геометро-оптичне наближення [4, 58], метод імпульсів [9, 10, 12, 16, 46]. Поділ оптичного імпульсу та кутового моменту еванесцентного поля на набір поляризаційно-залежних та поляризаційно-незалежних спінових та орбітальних компонент, дозволяє виділити дію компонент оптичної сили та оберտального моменту в залежності від природи останніх [9, 10, 12]. Найбільш повний аналіз та класифікацію оптичних сил та оберտальних моментів, що діють на частинки в еванесцентному полі, та їх зв'язок з відповідними компонентами оптичного імпульсу та спіну наводиться в [9]. Вплив тої чи іншої компоненти оптичної сили та оберտального моменту задається не тільки поляризацією падаючого пучка, але й значною мірою залежить від типу частинок та відповідного наближення для опису взаємодії поля з частинкою [9].

Орбітальний імпульс еванесцентного поля є причиною виникнення поздовжньої сили тиску випромінювання, що діє в z-напрямку. Орбітальний імпульс еванесцентного поля виникає незалежно від поляризації падаючого випромінювання. Однак, напруженість еванесцентного поля для р-поляризації падаючої хвилі є більшою ніж для s-поляризації [19]. Тому, значення оптичної сили, пов'язаної з передачею орбітального імпульсу, при р-поляризації падаючої хвилі буде більшим [22]. Передача орбітального імпульсу еванесцентного поля при взаємодії з частинками є досить добре вивченою та з успішністю використовується в прикладних цілях, починаючи ще з 1992 р. [9].

Перше експериментальне дослідження механічного впливу з боку еванесцентного поля на частинки демонструє робота [22] 1992 р. Тут досліджується рух сферичних мікрочастинок в еванесцентному полі, при ПВВ на поверхні призми, під дією сили тиску випромінювання в поздовжньому напрямку. Поздовжній рух частинок також спостерігається в еванесцентному полі хвилеводів [34, 35]. Крім цього, у даному

випадку виникають також градієнтні оптичні сили в поперечному та вертикальному напрямках.

Градієнтна оптична сила у вертикальному напрямку  $x$ , що виникає внаслідок просторової неоднорідності інтенсивності еванесцентного поля, пов'язана з уявною компонентою орбітального імпульсу [9]. Градієнтні оптичні сили з успіхом використовуються для оптичного захоплення та маніпулювання частинками у ближньому полі [4, 28, 29].

Наявність еліптичної поляризації еванесцентної хвилі, що виникає в площині падіння, та просторової неоднорідності еванесцентного поля у вертикальному напрямку  $x$  створюють умови для формування поляризаційно-незалежного поперечного спінового кутового моменту (поперечного спіну), що виникає навіть у випадку лінійної поляризованої падаючої хвилі [9]. Дана компонента спіну є «незвичайною», оскільки її напрямок дії є ортогональним до напрямку хвильового вектора, на відміну від традиційного спіну, властивого циркулярно поляризованій хвилі, напрямок дії якого є поздовжнім [12]. Як зазначено в [9, 12], вперше виникнення такого поперечного спіну було описано для поверхневих плазмонів-поляритонів [8] в 2012 р. При взаємодії еванесцентної хвилі з частинками, наявність поперечного спіну буде зумовлювати виникнення відповідного обертового моменту в площині  $xOz$  (Рис. 3) [9, 10]. Експериментальне підтвердження цього твердження наводиться в роботі [39], де демонструється обертання частинок Мі в еванесцентному полі, збудженому лінійно поляризованим падаючим пучком, в площині, що збігається з площиною падіння [9]. Виникнення обертового моменту в даному випадку пояснюється дією поздовжньої сили тиску випромінювання та вертикальної градієнтної сили, однак як зазначається в [9], даний обертовий момент породжується поперечним спіновим кутовим моментом еванесцентного поля.

Еванесцентна хвиля, що збуджується циркулярно чи еліптично поляризованою падаючою хвилею, характеризується наявністю поперечної компоненти густини спінового імпульсу [9, 11]. В [9] зазначено, що дана «незвичайна» поперечна компонента оптичного імпульсу, напрямлена ортогонально до напрямку хвильового вектора ( $z$ -напрямок), визначається ступенем циркулярної поляризації падаючої хвилі, та отожднюється з фундаментальним спіновим імпульсом, введеним в теорію поля Белінфанте [36]. Для неструктурованих оптичних полів, наявність поперечного спінового імпульсу не спостерігається та носить «віртуальний» характер, а напрям переносу енергії (вектор Умова-Пойнтінга), який асоціюється з напрямком хвильового вектора, буде визначатись дією канонічного (орбітального) імпульсу [9]. У випадку, зокрема, еванесцентного поля, вектор Умова-Пойнтінга визначатиметься сумарною дією спінового та орбітального імпульсу, та не співпадатиме з напрямком хвильового вектора [11]. Вперше наявність поперечної компоненти оптичного імпульсу було помічено Федоровим у 1955 р. [37], як поляризаційно-залежну поперечну компоненту вектора Умова-Пойнтінга в еванесцентному полі, що збуджувалось циркулярно поляризованою падаючою хвилею [9]. Експериментальне підтвердження наявності поперечного спінового імпульсу у еванесцентному полі було здійснено у 2015 році через дослідження дії поперечної поляризаційно-залежної сили на анізотропний нанооб'єкт, розміщений у еванесцентному полі, у випадку циркулярної поляризації падаючої хвилі [11]. При цьому, як зазначається в [11], сила, пов'язана зі спіновим імпульсом, не є за природою силою тиску випромінювання, а виникає через дифракцію на краях об'єкта, що підтверджує «віртуальний» характер поперечного спінового імпульсу [11].



В [46] наводиться теоретичний аналіз дії такої поперечної компоненти оптичної сили, пов'язаної зі спіновим імпульсом, на хіральні частинки в залежності від розміру та форми останніх. Поперечні оптичні сили, що діють на металічні частинки, які локалізовані на поверхнях, досліджуються також в [43, 47, 48].

Для еванесцентної хвилі, що збуджується циркулярно поляризованою падаючою хвилею, характерним є присутність спінового кутового моменту, що діє в поздовжньому напрямку, як і для випадку класичного спіну циркулярно поляризованого пучка [9, 12]. Наявність спінового кутового моменту супроводжуватиметься виникненням обертального моменту частинки в площині, поперечній до напрямку поширення хвилі ( $xOy$ ) [9]. В роботі [38] 1998-го року наводиться теоретичний аналіз компонент обертального моменту, що діють на сферичну частинку, в еванесцентному полі, збудженому циркулярно поляризованим гаусівським пучком. Показано, що в даному випадку існують дві компоненти обертального моменту, що визначаються кутовим моментом падаючого пучка (класичним спіном), а наявність третьої компоненти обертального моменту не залежить від циркулярної поляризації останнього, що може бути пояснено в рамках вищезазначеної концепції поперечного поляризаційно-незалежного спіну [9].

У випадку збудження еванесцентної хвилі лінійно поляризованою падаючою хвилею з азимутом  $\pm 45^\circ$ , як вже було вище зазначено, виникає поперечна компонента оптичного імпульсу, пов'язана з уявною частиною вектора Умова-Пойнтінга [9, 10, 12]. Дія такої складової не спостерігається для звичайних, неструктурованих оптичних полів, а в електродинаміці відображає потік «накопиченої» енергії [9, 13]. Для еванесцентного поля, наявність поперечної компоненти оптичного імпульсу, пов'язаного з уявною частиною вектора Умова-Пойнтінга, теоретично передбачено в [9, 12]. Результати теоретичного аналізу впливу на частинки поперечної поляризаційно-залежної оптичної сили, пов'язаної з поперечною уявною компонентою оптичного моменту наводяться в [9]. Експериментальні моделі по дослідженню впливу такої поперечної складової оптичної сили в еванесцентному полі розглянуті в [49–52, 56, 57]. Так, в [49] теоретично визначено умови співрозмірності оптичних сил та продемонстровано переміщення плоскопаралельної мікропластинки поліетилентерефталату в напрямку, відмінному від поздовжнього, за умови ПВВ на зовнішній поверхні поділу, що пояснюється взаємодією еванесцентної хвилі з частинками золота, нанесеним на поверхню пластинки. В [52] розглядається модель керування напрямком руху частинок золота над поверхнею біологічного зрізу, з урахуванням дії поперечної компоненти оптичної сили, шляхом зміни параметрів зондуючого пучка. В [56] представлено схему маніпулювання рухом еритроцитів в плазмі крові в поперечному напрямку, що досягається використанням двох падаючих пучків з протилежними азимутами поляризації  $+45^\circ$  та  $-45^\circ$  та кутами падіння. Слід зазначити, що останні роботи демонструють результати, які можуть бути використані для розв'язання прикладних задач біомедицини.

Як було вище зазначено, еванесцентна хвиля, що виникає у випадку лінійно поляризованої падаючої хвилі з азимутом  $\pm 45^\circ$ , характеризується також наявністю спінового кутового моменту, що діє у вертикальному  $x$ -напрямку (вертикального спіну) [9]. Вертикальний спін спричиняє дію на частинки обертального моменту в горизонтальній площині ( $yOz$ ) [9]. Результати теоретичного дослідження компоненти обертального моменту, спричиненого вертикальним спіном еванесцентного поля, на нано- та мікрооб'єкти, наводяться в [9, 56]. Зокрема, в [9] аналізується величина такого обертального моменту на частинки золота, в залежності від розміру останніх, та порівнюється з величиною обертального моменту, спричиненого іншими

компонентами спінового кутового моменту еванесцентної хвилі. В [56] проаналізовано величину обертального моменту в горизонтальній площині, що діє на еритроцит в еванесцентному полі, в залежності від зміни кута падіння пучка, та визначено умову, коли вплив такого обертального моменту буде максимальним. Однак, очевидної експериментальної демонстрації обертання частинок в горизонтальній площині, що пояснювалось би дією вертикального спіну еванесцентної хвилі, не спостерігається в наведених роботах, лише зазначається, що вертикальний спін може бути причиною обертання мікропластинок в комплексній дії разом із обертальним моментом внаслідок двопронезаломлення [49].

В [9] також аналізується вплив розміру частинок на значення оптичних сил та обертальних моментів, пов'язаних з характеристиками поля. Зазначається, що компоненти обертальних моментів, пов'язані із компонентами спіну, як і сила тиску, спричинена орбітальним імпульсом поля, виникають незалежно від типу частинок. В той час, поперечні оптичні сили, пов'язані з поперечним спіновим імпульсом та поперечною уявною компонентою оптичного імпульсу, не виникають у випадку Релеївських частинок, взаємодія з полем яких описується дипольним наближенням, але стають значними у випадку частинок більшого розміру (диполь-дипольна взаємодія, частинки  $Mi$ ) [9].

Існує також ряд робіт [40–42, 44, 45], що розглядає поведінку частинок в стоячих еванесцентних хвилях, що утворюються двома протилежно напрямленими падаючими пучками. Зокрема, в [40] порівнюється характер руху в часі релєївських частинок та частинок що описуються теорією Лоренца-Мі, в таких структурах. Досліджується формування двомірних оптичних пасток стоячими еванесцентними хвилями [42]. В таких двомірних структурах досліджується виникнення еліптичного обертання частинок [44]. Розглядається також двонапрявлене сортування частинок золота протилежно напрямленими еванесцентними хвилями [45].

Слід зазначити, що деякі роботи присвячені оптичному захопленню [28–30, 33] та маніпулюванню частинками еванесцентними хвилями [31, 43], інші розглядають безпосередній рух частинок в еванесцентному полі [22, 32, 34, 35, 41].

### **ВПЛИВ ПОПЕРЕЧНИХ КОМПОНЕНТ ОПТИЧНОГО ІМПУЛЬСУ ТА СПІНУ ЕВАНЕСЦЕНТНИХ ХВИЛЬ В БІОМЕДИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ**

Застосування оптичних пінцетів в біомедичних дослідженнях набуло широкого поширення [4]. Однак, на відміну від добре вивченого впливу поздовжньої компоненти оптичної сили [4, 59], результати, які демонструють механічний вплив поперечних компонент оптичного імпульсу та спіну еванесцентних хвиль в задачах біомедицини, наведені в [52, 56, 57]. Тут розглянуті моделі маніпулювання нано- та мікрооб'єктами в біологічному середовищі, під дією, зокрема, поперечної компоненти оптичної сили, що виникає у випадку збудження еванесцентного поля лінійно поляризованою падаючою хвилею з азимутом  $\pm 45^\circ$ . Так, в [52] розглядається можливість керованого переміщення наночастинок золота (діаметром 50 нм) в приповерхневому шарі тканинної рідини над поверхнею двопронезаломлюючого зрізу біотканини (дерма), що може бути застосовано з терапевтичною метою в задачах наномедицини [53]. Схема експериментальної реалізації такого підходу наведена на Рис. 4 (а). В даному випадку еванесцентна хвиля збуджується над поверхнею дерми в середовищі тканинної рідини. Умови формування поперечної компоненти оптичного імпульсу еванесцентної хвилі задаються параметрами зондуєного пучка (азимутом поляризації  $\varphi$  та кутом падіння  $\psi$ ) на першій поверхні зрізу. Результуючий напрямок переміщення частинок золота  $\vec{k}$  над поверхнею зрізу задається кутом  $\alpha$  до поздовжнього напрямку  $z$  в площині  $yOz$ , що

визначається дією поздовжньої та поперечної компоненти оптичної сили. При цьому, результати розрахунків показують, що актуалізація дії поперечної компоненти оптичної сили ( $\alpha \approx 10^\circ - 12^\circ$ ) досягається в досить широкому інтервалі кутів падіння зондуємого пучка ( $\psi \approx 60^\circ - 80^\circ$ ) при відповідних значеннях азимута поляризації  $\varphi$  та товщини зрізу  $d$  [52]. Таким чином, зміна параметрів зондуємого пучка, таких, як кут падіння, та азимут поляризації, дозволяє керувати напрямком переміщення наночастинок в приповерхневому шарі біологічного об'єкту, що дозволяє розширити можливості транспортування дозованих порцій ліків з метою обробки патологічних біоструктур [52]. Підходи поляризаційної оптики також з успішністю використовуються для діагностики патологій біотканин [54].

Однак, реалізація ПВВ на поверхні дерми є складною практичною задачею через неоднорідний рельєф зрізу тканини [55]. Реалізація вищезазначеного підходу передбачає використання додаткової оптичної пастки для утримання наночастинок над поверхнею зрізу, в межах області дії еванесцентного поля [44]. Експериментальне рішення такої задачі дозволило би розширити можливості неінвазивного методу керування мікродозами речовин [53].

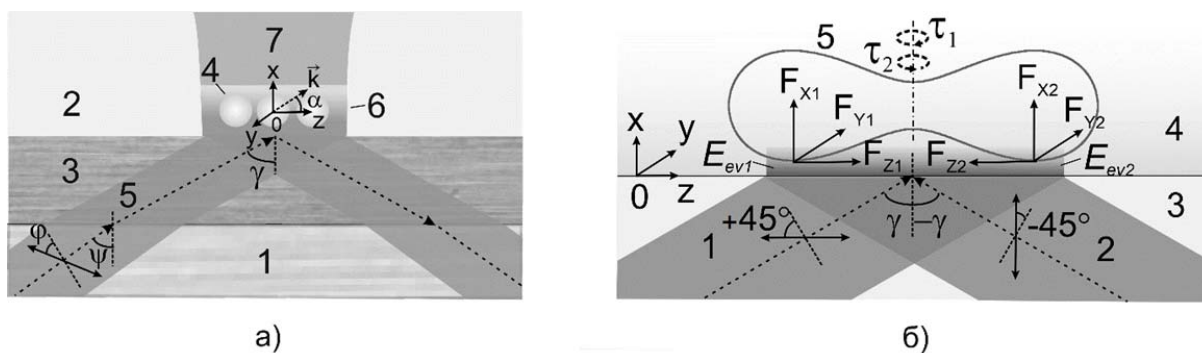


Рис. 4. Моделі застосування механічного впливу еванесцентних хвиль для задач біомедицини: а) Схема керування рухом частинок золота над поверхнею біологічного зрізу [52]: 1 — призма; 2 — тканинна рідина; 3 — біологічний зріз (дерма); 4 — частинки золота; 5 — падаючий пучок під кутом  $\gamma$ , що формує еванесцентну хвилю 6; 7 — додаткова оптична пастка для утримання частинок над поверхнею зрізу;  $\varphi$ ,  $\psi$  — азимут поляризації та кут падіння зондуємого пучка;  $\vec{k}$  — результуючий напрямок переміщення частинок золота над поверхнею зрізу, що задається кутом  $\alpha$  до поздовжнього напрямку  $z$ ; б) Схема керування рухом еритроцитів у плазмі крові в поперечному напрямку [56, 57]: 1, 2 — падаючі пучки під кутами  $\gamma$ ,  $-\gamma$ , з азимутами поляризації  $+45^\circ$  та  $-45^\circ$ , що формують еванесцентні хвилі  $E_{ev1}$  та  $E_{ev2}$ ; 3 — призма, 4 — плазма крові, 5 — еритроцит;  $F_{x1}$ ,  $F_{y1}$ ,  $F_{z1}$ ,  $\tau_1$ ,  $F_{x2}$ ,  $F_{y2}$ ,  $F_{z2}$ ,  $\tau_2$  — компоненти оптичних сил та обертальні моменти для кожної з еванесцентних хвиль відповідно.

З метою пошуку експериментальних підходів формування еванесцентних полів для біомедичних застосувань було запропоновано також дослідити вплив еванесцентної хвилі на еритроцити в плазмі крові [56, 57]. В даному випадку мова йде про інвазивні впливи через практично однакові значення показників заломлення стінок кровоносних судин та плазми [55] і формування ПВВ на межі поділу «дерма-кровоносна судина». Теоретичні та експериментальні підходи оптичного маніпулювання еритроцитами вже розглядалися для заломлених пучків [58], в еванесцентному полі хвилеводів [59], в ближньому полі при використанні двох еванесцентних хвиль [62]. Зокрема, наводяться результати як поступального та обертального руху [58–62], так і деформації еритроцитів [62] під дією оптичного випромінювання. Однак, на відміну від попередніх досліджень, в [56, 57] розглядається модель керування рухом еритроцитів в поперечному напрямку, під дією поперечної компоненти оптичної сили. Для опису взаємодії еванесцентного поля з еритроцитом, вільно плаваючим в плазмі крові, форма

поверхні еритроцита моделюється у вигляді двоввігнутого дискоїда [63] та може бути представлена набором площадок трикутної форми [58]. Результати розрахунків показують, що величина поздовжньої компоненти оптичної сили, що діє на еритроцит, є на порядок більшою, ніж поперечної [56, 57]. Тому для демонстрації переміщення еритроцита в поперечному напрямку пропонується використання двох лінійно поляризованих падаючих пучків з азимутами поляризації  $+45^\circ$  та  $-45^\circ$  відповідно. В даному випадку, еванесцентні хвилі поширюються в протилежних напрямках, тому поздовжні компоненти оптичних сил, що діють на еритроцит, та обертальні моменти, спричинені вертикальним спіном, є взаємно скомпенсованими, а поперечні компоненти взаємно підсилюються [56, 57]. Врахування в'язкості середовища дозволяє оцінити швидкість руху еритроцитів в плазмі крові в поперечному напрямку, в залежності від умов опромінення. Зокрема, при куті падіння пучків  $\gamma = 62^\circ$  швидкість досягає значення близько 9 мкм/с [56]. Наводиться також модель експериментального дослідження такого руху еритроцитів в плазмі крові. Запропонований метод маніпулювання рухом еритроцитів в плазмі крові може бути використаний з метою розширення підходів контролю кровоносної системи [61], наприклад, для відновлення прохідності судин та кровопостачання тканин.

### ВИСНОВКИ

Еванесцентні хвилі володіють складною структурою розподілу поляризаційно-залежних та поляризаційно-незалежних компонент оптичного імпульсу та спіну, що визначають дію на мікро- та нанооб'єкти відповідних компонент оптичної сили та обертального моменту. В загальному випадку, в еванесцентному полі можуть виникати три компоненти оптичної сили та обертального моменту, що робить їх застосування більш привабливим для оптичного захоплення та маніпулювання об'єктами в порівнянні з класичними оптичними пінцетами. Нещодавно досліджені поперечні компоненти оптичного імпульсу та спіну створюють «незвичайний» механічний вплив на частинки, дія якого може бути ортогональною до дії світлового тиску, чи задавати обертання в різних площинах на відміну від поперечної. Практичні реалізації запропонованих методів можуть бути використані для розв'язання прикладних задач, зокрема, в біомедицині: з метою транспортування терапевтичних агентів в патологічно уражені ділянки чи для відновлення прохідності судин та кровопостачання тканин.

### ПОДЯКА

Робота підтримувалась державним фондом в рамках держбюджетної теми кафедри кореляційної оптики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича: «Застосування оптичних потоків енергії для розв'язання задач мікро- та нанооптики», №0119U100714 (2019–2021 рр.).

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### Authors' ORCID ID

O.V. Angelsky  <https://orcid.org/0000-0002-5463-8961>

C.Yu. Zenkova  <https://orcid.org/0000-0002-9108-8591>

D.I. Ivanskyi  <https://orcid.org/0000-0001-9588-5603>

### REFERENCES

1. Poynting JH. The momentum of a beam of light. Atti del IV Congresso Internazionale dei Matematici. 1909;3:169–74.

2. Poynting JH. The wave-motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light. *Proc R Soc Lond A*. 1909;82:560–7. <http://doi.org/10.1098/rspa.1909.0060>
3. Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Phys Rev Lett*. 1970;24:156–9. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.24.156>
4. Padgett MJ, Molloy J, McGloin D. *Optical Tweezers: Methods and Applications*. CRC Press; 2010. 508 p.
5. Zenkova CYu, Gorsky MP, Ryabyj PA. Phase retrieval of speckle fields based on 2D Hilbert transform. *Optical Memory and Neural Networks*. 2015 Oct;24(4):303–8. <https://doi.org/10.3103/S1060992X15040074>
6. Angelsky OV, Zenkova CYu, Gorsky MP, Ryabiy PA. Search for methods of restoring spatial phase distribution of complex optical fields. *The Open Optics Journal*. 2014;8(1):3–13. <http://doi.org/10.2174/1874328501408010003>
7. Zenkova CYu, Gorsky MP, Ryabiy PA, Angelskaya AO. Additional approaches to solving the phase problem in optics. *Appl Opt*. 2016;55(12):B78–B84. <https://doi.org/10.1364/ao.55.000b78>
8. Bliokh KY, Nori F. Transverse spin of a surface polariton. *Phys Rev A*. 2012 Jul;85(6):061801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.85.061801>
9. Bliokh KY, Bekshaev AY, Nori F. Extraordinary momentum and spin in evanescent waves. *Nat Commun*. 2014;5:3300. <https://doi.org/10.1038/ncomms4300>
10. Bliokh KY, Nori F. Transverse and longitudinal angular momenta of light. *Phys Rep*. 2015;592:1–38. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2015.06.003>
11. Antognozzi M, Bermingham C, Harniman R, Simpson S, Senior J, Hayward R, et al. Direct measurements of the extraordinary optical momentum and transverse spin-dependent force using a nano-cantilever. *Nat Phys*. 2016;12:731–5. <https://doi.org/10.1038/nphys3732>
12. Bekshaev AY. Dynamical characteristics of an electromagnetic field under conditions of total reflection. *J Opt*. 2018;20(4):045604. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aab035>
13. Jackson JD. *Classical electrodynamics*. New York: John Wiley & Sons; 1998. 832 p. ISBN: 978-0-471-30932-1
14. Andrews DL. *Structured light and its applications: An introduction to phase-structured beams and nanoscale optical forces*. Amsterdam: Elsevier; 2008. 400 p. ISBN: 9780123740274
15. Angelsky OV, Polyanskii PV, Mokhun II, Zenkova CYu, Bogatyryova HV, Felde CV, et al. Optical measurements: polarization and coherence of light fields. *Modern Metrology Concerns*, Dr. Luigi Cocco (Ed.). INTECH Open Access Publisher; 2012. pp. 263–316. <https://doi.org/10.5772/36553>
16. Bekshaev AY, Angelsky OV, Sviridova SV, Zenkova CYu. Mechanical action of inhomogeneously polarized optical fields and detection of the internal energy flows. *Advances in Optical Technologies*. 2011;723901. <https://doi.org/10.1155/2011/723901>
17. Keigo I, editor. *Boundaries, near-field optics and near-field imaging*. In: *Elements of photonics*. Vol. I: In Free space and special media. New York: John Wiley & Sons; 2002. p. 110–65. ISBN: 0-471-83938-8
18. de Fornel F. *Evanescence waves: From newtonian optics to atomic optics*. Berlin: Springer; 2001. 270 p. ISBN: 978-3-540-65845-0
19. Axelrod D. Chapter 1 – Evanescent excitation and emission. In: *Anda Cornea, P. Michael Conn, editors. Fluorescence microscopy: Super-resolution and other novel techniques*. 1st ed. Waltham: Elsevier; 2014. p. 1–14. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409513-7.00001-4> ISBN: 978-0-12-409513-7
20. Jozefowski L, Fiutowski J, Kawalec T, Rubahn H-G. Direct measurement of the evanescent-wave polarization state. *J Opt Soc Am B*. 2007;24:624–8. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.24.000624>
21. Kawalec T, Józefowski L, Fiutowski J, Kasprówicz MJ, Dohnalik T. Spectroscopic measurements of the evanescent wave polarization state. *Opt Commun*. 2007;274(2):341–6. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.02.042>
22. Kawata S, Sugiura T. Movement of micrometer-sized particles in the evanescent field of a laser beam. *Opt Lett*. 1992;17(11):772–4. <https://doi.org/10.1364/OL.17.000772>
23. Almaas E, Brevik I. Radiation forces on a micrometer-sized sphere in an evanescent field. *Opt Soc Am B*. 1995;12:2429–38. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.12.002429>
24. Chang S, Kim J, Jo J, Lee S. Optical force on a sphere caused by the evanescent field of a Gaussian beam; effects of multiple scattering. *Opt Commun*. 1997;139(4–6):252–61. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(97\)00144-2](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(97)00144-2)
25. Bekshaev A, Bliokh K, Nori F. Mie scattering and optical forces from evanescent fields: A complex-angle approach. *Opt Express*. 2013;21(6):7082–95. <https://doi.org/10.1364/OE.21.007082>
26. Nieto-Vesperinas M, Saenz J. Optical forces from an evanescent wave on a magnetodielectric small particle. *Opt Lett*. 2010;35(23):4078–80. <https://doi.org/10.1364/OL.35.004078>
27. Sasaki K, Hotta J, Wada K, Masuhara H. Analysis of radiation pressure exerted on a metallic particle within an evanescent field. *Opt Lett*. 2000;25(18):1385–7. <https://doi.org/10.1364/OL.25.001385>

28. Gaugiran S, Gétin S, Fedeli J, Derouard J. Polarization and particle size dependence of radiative forces on small metallic particles in evanescent optical fields. Evidences for either repulsive or attractive gradient forces. *Opt Express*. 2007;15(13):8146–56. <https://doi.org/10.1364/OE.15.008146>
29. Ganic D, Gan X, Gu M. Trapping force and optical lifting under focused evanescent wave illumination. *Opt Express*. 2004;12(22):5533–8. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005533>
30. Volpe G, Quidant R, Badenes G, Petrov D. Surface plasmon radiation forces. *Phys Rev Lett*. 2006;96:238101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.238101>
31. Righini M, Volpe G, Girard C, Petrov D, Quidant R. Surface plasmon optical tweezers: tunable optical manipulation in the femtonewton range. *Phys Rev Lett*. 2008 May 6;100(18):186804 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.186804>
32. Wang K, Schonbrun E, Crozier K. Propulsion of gold nanoparticles with surface plasmon polaritons: evidence of enhanced optical force from near-field coupling between gold particle and gold film. *Nano Lett*. 2009;9(7):2623–9. <https://doi.org/10.1021/nl900944y>
33. Min C, Shen Z, Shen J, Zhang Y, Fang H, Yuan G., et al. Focused plasmonic trapping of metallic particles. *Nature Commun*. 2013;4(1):2891. <https://doi.org/10.1038/ncomms3891>
34. Kawata S, Tani T. Optically driven Mie particles in an evanescent field along a channeled waveguide. *Opt Lett*. 1996;21(21):1768–70. <https://doi.org/10.1364/OL.21.001768>
35. Yang A, Lerdsuchatawanich T, Erickson D. Forces and transport velocities for a particle in a slot waveguide. *Nano Lett*. 2009;9(3):1182–8. <https://doi.org/10.1021/nl803832q>
36. Belinfante F. On the current and the density of the electric charge, the energy, the linear momentum and the angular momentum of arbitrary fields. *Physica*. 1940;7(5):449–74. [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(40\)90091-X](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(40)90091-X)
37. Fedorov F. To the theory of total reflection. *J Opt*. 2013;15(1):014002. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/15/1/014002>
38. Chang S, Lee SS. Optical torque exerted on a sphere in the evanescent field of a circularly-polarized Gaussian laser beam. *Optics Commun*. 1998;151(4–6):286–96. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(98\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(98)00067-4)
39. Song YG, Chang S, Jo JH. Optically induced rotation of combined Mie particles within an evanescent field of a Gaussian beam. *Jpn J Appl Phys*. 1999;38(Part 2, No. 4A):L380–3. <https://doi.org/10.1143/JJAP.38.L380>
40. Šiler M, Čižmár T, Šerý M, Zemánek P. Optical forces generated by evanescent standing waves and their usage for sub-micron particle delivery. *Appl Phys B*. 2006;84(1–2):157–65. <https://doi.org/10.1007/s00340-006-2235-9>
41. Šiler M, Čižmár T, Jonáš A, Zemánek P. Surface delivery of a single nanoparticle under moving evanescent standing-wave illumination. *New J Phys*. 2008;10(11):113010. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/10/11/113010>
42. Šiler M, Zemánek P. Parametric study of optical forces acting upon nanoparticles in a single, or a standing, evanescent wave. *J Opt*. 2011;13(4):044016. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/13/4/044016>
43. Paul N, Kemp B. Optical manipulation of small particles on the surface of a material. *J Opt*. 2016;18(8):085402. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/8/085402>
44. Liu L, Kheifets S, Ginis V, Di Donato A, Capasso F. Elliptical orbits of microspheres in an evanescent field. *PNAS*. 2017;114(42):11087–91. <https://doi.org/10.1073/pnas.1714953114>
45. Ploschner M, Čižmár T, Mazilu M, Di Falco A, Dholakia K. Bidirectional optical sorting of gold nanoparticles. *Nano Lett*. 2012;12(4):1923–7. <https://doi.org/10.1021/nl204378r>
46. Hayat A, Mueller JPB, Capasso F. Lateral chirality-sorting optical forces. *PNAS*. 2015;112(43):13190–4. <https://doi.org/10.1073/pnas.1516704112>
47. Wang SB, Chan CT. Lateral optical force on chiral particles near a surface. *Nat Commun*. 2014;5(1):3307. <https://doi.org/10.1038/ncomms4307>
48. Rodríguez-Fortuño F, Engheta N, Martínez A, Zayats A. Lateral forces on circularly polarizable particles near a surface. *Nat Commun*. 2015;6(1):8799. <https://doi.org/10.1038/ncomms9799>
49. Angelsky OV, Hanson SG, Maksimyak PP, Maksimyak AP, Zenkova CYu, Polyanskii PV, et al. Influence of evanescent wave on birefringent microplates. *Opt Express*. 2017;25(3):2299–311. <https://doi.org/10.1364/OE.25.002299>
50. Zenkova CYu, Ivanskyi DI, Kiyashchuk TV. Optical torques and forces in birefringent microplate. *Opt Appl*. 2017;47(3):483–492. <https://doi.org/10.5277/oa170313>
51. Maksimyak PP, Maksimyak AP, Ivanskyi DI, Kiyashchuk TV. Extraordinary spin momenta in birefringent structures. *Opt Mem Neural Network*. 2017;26(2):157–64. <https://doi.org/10.3103/S1060992X17020059>
52. Angelsky OV, Zenkova CYu, Ivanskyi DI. Mechanical action of the transverse spin momentum of an evanescent wave on gold nanoparticles in biological objects media. *J Optoelectron Adv M*. 2018;20(5–

- 6):217–23. Available from: <https://joam.inoe.ro/articles/mechanical-action-of-the-transverse-spin-momentum-of-an-evanescent-wave-on-gold-nanoparticles-in-biological-objects-media/fulltext>
53. Sabatini DM, editor. *Leading Edge Nanotechnology. Research. Developments.* New York: Nova Science Publishers; 2007. 304 p. ISBN: 9781600219009
54. Angelsky OV, Ushenko YA, Dubolazov AV, Telenha OY. The interconnection between the coordinate distribution of Mueller-matrixes images characteristic values of biological liquid crystals net and the pathological changes of human tissues. *Adv Opt Technol.* 2010;130659. <http://doi.org/10.1155/2010/130659>
55. Tuchin VV, editor. *Handbook of optical biomedical diagnostics, Volume 1: Light-Tissue Interaction.* 2nd ed. New York: SPIE; 2016. 864 p. ISBN: 9781628419092. <https://doi.org/10.1117/3.2219603>
56. Angelsky O, Maksymyak P, Zenkova C, Maksymyak A, Hanson S, Ivanskyi D. Peculiarities of control of erythrocytes moving in an evanescent field. *J Biomed Opt.* 2019;24(05):055002. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.24.5.055002>
57. Angelsky OV, Zenkova CYu, Maksymyak PP, Ivanskyi DI, Tkachuk VM. Peculiarities of energy circulation in evanescent field. Application for red blood cells. *Opt Mem Neural Network (Information Optics).* 2019;28(1):11–20. <https://doi.org/10.3103/S1060992X19010028>
58. Grover SC, Gauthier RC, Skirtach AG. Analysis of the behavior of erythrocytes in an optical trapping system. *Opt Express.* 2000;7(13):533–9. <https://doi.org/10.1364/OE.7.000533>
59. Ahluwalia BS, Mc Court P, Huser T, Hellesø OG. Optical trapping and propulsion of red blood cells on waveguide surfaces. *Opt Express.* 2010;18(20):21053–61. <https://doi.org/10.1364/OE.18.021053>
60. Yoon Y-Z, Cicuta P. Optical trapping of colloidal particles and cells by focused evanescent fields using conical lenses. *Opt. Express.* 2010;18(7):7076–84. <https://doi.org/10.1364/OE.18.007076>
61. Zhong M, Wei X, Zhou J, Wang Z, Li Y. Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers. *Nat Commun.* 2013;4:1768. <https://doi.org/10.1038/ncomms2786>
62. Gu M, Kuriakose S, Gan X. A single beam near-field laser trap for optical stretching, folding and rotation of erythrocytes. *Opt. Express.* 2007;15(3):1369–75. <https://doi.org/10.1364/OE.15.001369>
63. Kugeiko MM, Smuney DA. Estimation of the microphysical parameters for native red blood cells based on the measured optical properties of scattered radiation. *Vestnik BGU. Serija 1, Fizika. Matematika. Informatika [Vestnik of Belarusian State University. Ser. 1, Physics. Mathematics. Informatics].* 2016;1(2):73–8. Available from: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/171864> (in Russian)