

Научная статья
УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 1.3.6.
PACS 42.25.Bs
OCIS 260.2110
MSC 78A10

Исследование физических свойств пондеромоторных сил в наноструктурах

В. В. Левочкина  ¹

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 23 сентября 2024 года

После переработки 25 сентября 2024 года

Опубликована 28 декабря 2024 года

Аннотация. Представлены результаты исследования физических свойств пондеромоторных сил в наноструктурах. Существует необходимость понимания механизмов взаимодействия электромагнитных полей с наноструктурами для разработки оптомеханических устройств и приборов. Методы исследования включают теоретические расчёты и компьютерное моделирование взаимодействия электромагнитных полей с наноструктурами с учётом пондеромоторных сил. Получены новые представления о влиянии геометрии наноструктур на характеристики пондеромоторных сил, а также разработка подходов для управления пондеромоторными силами. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения полученных результатов для создания эффективных наноустройств и систем, таких как сенсоры.

Ключевые слова: наноструктура, сила, пондеромоторная сила, наночастица, электромагнитное поле, локальное усиление поля, градиент локального поля, затухающее ближнее поле

Введение

Исследование физических свойств пондеромоторных сил в наноструктурах направлено на изучение механизмов взаимодействия лазерного излучения с веществом и их влияния на заряженные частицы. Актуальность исследования физических свойств пондеромоторных сил в наноструктурах обусловлена их значительным влиянием на поведение материалов в наноразмерных масштабах, что актуально для создания новых технологий в области электроники, материаловедения и медицины. Актуальность исследования обусловлена быстрым развитием технологий, связанных с использованием лазерного излучения, и необходимостью глубокого понимания физических процессов, происходящих при взаимодействии заряженных частиц с электромагнитным полем.

¹E-mail: sokolovavasilevna2002@inbox.ru

Целью работы является исследование физических свойств пондеромоторных сил в наноструктурах для определения их воздействия на механические и электрооптические характеристики наноструктурных материалов на основе аналитических и численных расчётов пондеромоторных сил, и определении условий эффективного управления пондеромоторными силами в наноструктурах, находящихся в электромагнитном поле.

Задачи исследования включают:

1. написание обзора литературы по влиянию различных физических факторов на силу пондеромоторных сил в наноструктурах для определения основных факторов, влияющих на величину пондеромоторных сил в наноструктурах,
2. исследование основных физических принципов функционирования наноструктур с учётом влияния пондеромоторных сил в наноструктурированном материале на основе развития аналитической теории пондеромоторных сил в наноструктурах,
3. численное исследование физических особенностей пондеромоторных сил в наноструктуре для применения наноструктур в технологических процессах нанoeлектроники.

Объектом исследования являются наноструктуры в электромагнитных полях различной интенсивности и конфигурации. Предметом исследования являются физические свойства пондеромоторных сил, возникающих в наноструктурах под воздействием внешних электромагнитных полей.

Методы исследования включают в себя аналитические методы исследования пондеромоторных сил на уровне атомов в наноструктурах, компьютерное моделирование для численного анализа пондеромоторных сил на уровне атомов в наноструктурах, компьютерные методы обработки результатов исследования для оценки взаимодействия частиц в наноструктурах. Материалы исследования являются наноструктуры в поле электромагнитного излучения, а также программное обеспечение для анализа результатов исследований сил взаимодействия заряженных частиц в наноструктурах.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые установлены закономерности зависимостей пондеромоторных сил от геометрических параметров наноструктур, выявлены факторы, влияющих на силу пондеромоторных сил в наноструктурах, обнаружены зависимости пондеромоторных сил от поляризации излучения электромагнитной волны, разработана теория пондеромоторных сил в наноструктурных средах.

Теоретическая значимость научного исследования заключается в развитии теоретических представлений о взаимодействии заряженных частиц с электромагнитным полем, что может открывает возможности для новых приложений в области оптоэлектроники. Пондеромоторные силы охватывают широкий спектр взаимодействий, оказывающих влияние на динамику наночастиц и структур, поэтому глубокое понимание этих взаимодействий открывает возможности для новых приложений в области оптоэлектроники и нанотехнологий.

Практическая значимость научного исследования связана с возможностью эффективного управления заряженными частицами в электромагнитном, что может найти применение в различных областях науки и техники, таких как ускорение заряженных частиц, охлаждение и локализация атомов и молекул. Результаты исследования могут быть использованы в различных областях науки и техники, в том числе в нанотехнологиях, наносхемах.

Обзор работ по пондеромоторным силам в наноструктурах

Пондеромоторные силы в наноструктурах возникают из-за взаимодействия электромагнитных полей с наночастицами, что приводит к значительным механическим

эффектам. Исследования показывают, что локальные градиенты поля, усиленные близостью наночастиц, могут генерировать пондеромоторные силы, которые преимущественно действуют на поверхности более крупных наночастиц, с плотностью силы, достигающей нескольких десятков наноНьютонов [1]. В статье [1] эффекты взаимодействия ближнего поля в самосогласованной системе и концепция эффективной восприимчивости были смоделированы и воспроизведены с использованием модельного распределения локального поля в системе двух наночастиц разного размера. Пондеромоторные силы в наноструктурах возникают из-за градиентов локального поля, влияющих на поверхности наночастиц, с потенциальными приложениями в биологических системах, как обсуждалось в исследовании взаимодействия двух наночастиц [1]. Это явление особенно актуально в приложениях, связанных с металлическими наноантеннами, где высокие локальные усиления поля и градиенты могут быть достигнуты с помощью фемтосекундных лазерных импульсов, что позволяет отклонять электроны и модулировать электронные пучки для сверхбыстрой электронной микроскопии [2]. Металлические наноантенны могут генерировать достаточную пондеромоторную силу для отклонения электронов за счёт поверхностного плазмонного резонанса, обеспечивая сверхбыстрые электронные переключатели для таких приложений, как сверхбыстрая электронная микроскопия [2]. В статье [3] микроволновое излучение может разлагать непрерывные материалы твёрдого раствора на составляющие их фазы, процесс, который термодинамически невыгоден в равновесии, и подробный анализ взаимодействия электромагнитной волны с материалом показал, что сильная пондеромоторная сила предпочтительно разделяет составляющие фазы посредством усиленного процесса массопереноса, усиливающегося особенно вблизи границы раздела сред. Интерфейсная пондеромоторная сила в твёрдых телах вызывает растворение под действием поля и неравновесное образование нанокompозита, как обсуждается в статье [3]. Кроме того, исследования золотых наноострий показывают, что интенсивные поля лазера среднего инфракрасного диапазона могут вызывать неадиабатические пондеромоторные эффекты, приводящие к сдвигам кинетической энергии испускаемых электронов, что дополнительно иллюстрирует сложное взаимодействие между интенсивностью лазера и динамикой электронов в наноструктурах [4]. В статье [4] была исследована электронная эмиссия из золотого наноострия, возбуждаемая лазерными импульсами средней инфракрасной области спектра с несколькими циклами, и было получено аналитическое выражение для неадиабатического пондеромоторного сдвига. Неадиабатические пондеромоторные эффекты в наноструктурах возникают в результате передачи пондеромоторного потенциала в кинетическую энергию электронов из-за распадающихся ближних полей, что влияет на характеристики электронной эмиссии в интенсивных лазерных полях [4]. Неадиабатические пондеромоторные эффекты в наноструктурах возникают в результате передачи пондеромоторного потенциала в кинетическую энергию электронов за счёт затухающих ближних полей, влияющих на электронную эмиссию в интенсивных лазерных полях. В работе [5] предлагается численная модель деградации катода с автоэмиссией на основе углеродных наноматериалов для прогнозирования срока службы катода и его поведения в течение длительного времени. Пондеромоторные силы влияют на долгосрочную стабильность катодов с автоэмиссией на основе наноуглеродных материалов, уменьшая места эмиссии, влияя на срок службы и поведение катода [5]. В статье [6] предлагается численная модель деградации катода с полевой эмиссией на основе углеродных наноматериалов для прогнозирования срока службы катода и его поведения в течение длительного времени. В работе [6] обсуждается влияние пондеромоторных сил на долгосрочную стабильность катодов с полевой эмиссией на основе наноуглеродных материалов, что даёт представление о деградации места эмиссии с течением времени. В статье [7] исследуется влияние пондеромоторных

сил на полевую эмиссию из выровненных плёнок углеродных нанотрубок и используется модель вертикально выровненных нанотрубок, регулярно расположенных в сотовом порядке. Пондеромоторные силы влияют на полевую эмиссию в плёнках углеродных нанотрубок, влияя на плотность тока и целостность нанотрубок. Теоретические оценки включают моделирование модуля Юнга и рассеяния волновых пакетов для точных расчётов [7]. В работе [8] рассмотрены возможности использования режимов ТЕМ 01 и ТЕМ 10 для сильно релятивистских интенсивностей, доступных для существующих сверхинтенсивных лазеров, в частности для режимов ТЕМ 1 и ТЕМ 10. Пондеромоторная сила играет решающую роль в экспериментах с высоким полем с петаваттными лазерами, концентрируя энергию для управления ионизированными электронами, что может быть актуально в исследованиях наноструктур. В работе [9] было показано, что уравнение движения, полученное из широко цитируемого пондеромоторного потенциала, согласуется с численно вычисленной орбитой только в ограниченном диапазоне параметров и что за пределами этого диапазона оно демонстрирует особенности, которые несовместимы с любым пондеромоторным потенциалом, квадратичным по амплитуде поля. В статье [9] обсуждается пондеромоторная сила в физике плазмы с упором на высокочастотные электромагнитные поля. В статье [10] обсуждается, как пондеромоторные силы в сильно неоднородных полях могут манипулировать частицами, предлагая потенциальные приложения в наноструктурах для нарезки пучка частиц, охлаждения, захвата и асимметричной передачи. В работе [10] для этого случая найден приближенный интеграл движения частиц и соответственно введён новый пондеромоторный потенциал, который может быть использован для нарезки пучка частиц в сильно неоднородных полях. В статье [11] представлены усреднённые уравнения движения частицы в электромагнитной волне произвольной частоты с её волновым вектором, направленным вдоль окружающего магнитного поля, где частица также подвергается дрейфу под действием электромагнитного поля и фоновому электрическому полю, медленно меняющемуся в пространстве и действующему вдоль линии магнитного поля. В статье [11] обсуждаются пондеромоторные силы при наличии электрических полей в плазменных частицах, а не в наноструктурах. В статье [12] обсуждается пондеромоторная сила в плазме, вызванная электронным спином, с использованием модели с корреляциями спин-скорость, которая может быть важна для понимания пондеромоторных эффектов в наноструктурах. Модель спин-жидкости, используемая в статье [12], содержит корреляции спин-скорость, в отличие от предыдущих моделей, используемых для той же цели, и затем обнаруживается, что предыдущие члены для спин-пондеромоторной силы восстанавливаются, но также появляются дополнительные члены. В статье [13] показано, что магнитоподобная сила возникает в общем случае в потенциальных силовых полях с быстрой периодической зависимостью от времени, включая, но не ограничиваясь вращательной зависимостью, и это не было показано ранее, за исключением линейного случая быстро вращающегося квадратичного седлового потенциала. В статье [13] обсуждается пондеромоторная сила Лоренца в быстро меняющихся потенциалах, включая наноструктуры. Она раскрывает эффект магнитоподобной силы за пределами традиционной пондеромоторной силы. В статье [14] рассматривается пондеромоторная сила, связанная с однородной электромагнитной волной, распространяющейся в среде с изменяющимися во времени диэлектрическими свойствами, полученная и проверенная с помощью одномерного моделирования методом частиц в ячейках. В целом, эти результаты подчеркивают потенциал пондеромоторных сил в продвижении приложений нанотехнологий.

Проведённый обзор научных работ по пондеромоторным силам в наноструктурах показал актуальность темы исследования.

Результаты

Рассмотрим наноматериал, в котором на наночастицы действуют пондеромоторные силы. Вектор силы и вектор момента сил в случае действия пондеромоторных сил находятся по формулам:

$$\mathbf{F} = \varepsilon_0 \varepsilon \oint_S \left(\mathbf{E} (\mathbf{nE}) - \frac{1}{2} \mathbf{E}^2 \mathbf{n} \right) dS, \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \varepsilon_0 \varepsilon \oint_S \left([\mathbf{nE}] (\mathbf{nE}) - \frac{1}{2} \mathbf{E}^2 [\mathbf{rn}] \right) dS. \quad (2)$$

Объёмная плотность пондеромоторных сил вычисляется по формуле:

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{F}}{V} = \rho \mathbf{E} + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \nabla \left(\mathbf{E}^2 \rho_m \frac{\partial \varepsilon}{\rho_m} \right) - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \mathbf{E}^2 \nabla \varepsilon, \quad (3)$$

где ρ – объёмная плотность сторонних электрических зарядов, \mathbf{E} – напряжённость электрического поля, ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость среды, ρ_m – плотность среды.

Если в среде сторонние заряды отсутствуют ($\rho = 0$), то

$$\mathbf{f} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) \nabla \mathbf{E}^2. \quad (4)$$

Выражение пондеромоторной силы для твёрдой наночастицы в диэлектрической матрице имеет вид:

$$\mathbf{F} = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_{m1} a_1^3 \frac{\varepsilon_{i1} - \varepsilon_{m1}}{\varepsilon_{i1} + 2\varepsilon_{m1}} \frac{1}{2} \nabla \mathbf{E}^2. \quad (5)$$

или для абсолютной величины пондеромоторной силы для твёрдой наночастицы в диэлектрической матрице получаем

$$F = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_{m1} a_1^3 \frac{\varepsilon_{i1} - \varepsilon_{m1}}{\varepsilon_{i1} + 2\varepsilon_{m1}} E \frac{dE}{dx}. \quad (6)$$

Пондеромоторная сила обусловлена разницей между диэлектрической проницаемостью твёрдой наночастицы, обладающей диэлектрической проницаемостью ε_i и диэлектрической проницаемостью матрицы среды ε_1 . Пондеромоторная сила стремится вытолкнуть наночастицы в более слабые участки электрического поля, если $\varepsilon_{i1} < \varepsilon_{m1}$, и, наоборот, втянуть при $\varepsilon_{i1} > \varepsilon_{m1}$.

Вектор напряжённости электрического поля внешней волны представим в виде

$$\mathbf{E}(z, x) = \mathbf{E}_0 \exp(-\kappa z) \exp(ik_x x), \quad (7)$$

где $k_x = k_0 n$, $k_z = i\kappa$. После вычисления производной от вектора напряжённости электрического поля внешней волны получим выражение:

$$\frac{\partial \mathbf{E}(z, x)}{\partial x} = \mathbf{E}_0 \exp(-\kappa z) \exp(ik_x x) ik_x. \quad (8)$$

Подставляя в выражение пондеромоторной силы для твёрдой наночастицы в диэлектрической матрице, получим следующее выражение:

$$F(z, x) = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_{m1} a_1^3 \frac{\varepsilon_{i1} - \varepsilon_{m1}}{\varepsilon_{i1} + 2\varepsilon_{m1}} |\mathbf{E}_0|^2 \exp(-2\kappa z) \exp(i2k_x x) ik_x. \quad (9)$$

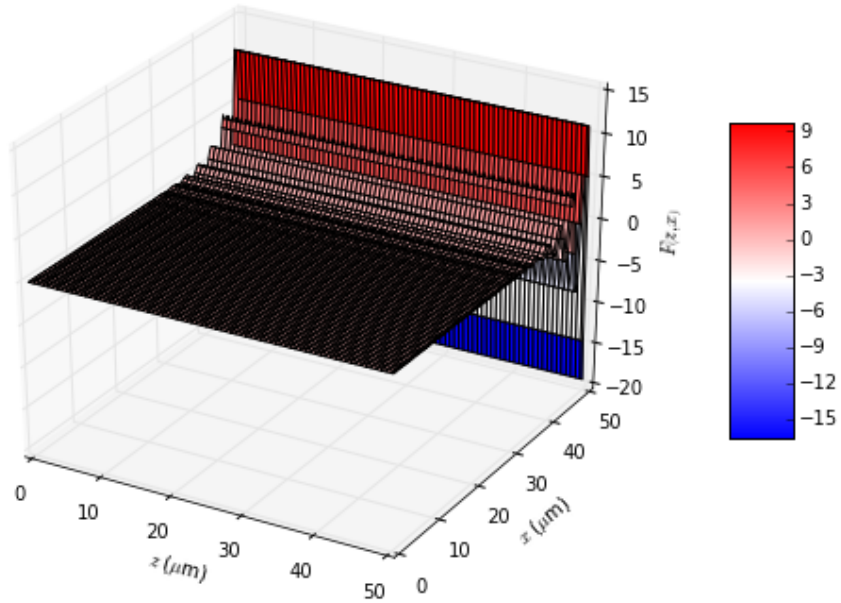


Рис. 1. Зависимость действительной части силы (9) от координат z и x на длине волны излучения, равной $\lambda = 405$ нм. Фактор заполнения среды наночастицами составляет 3%. Средний радиус наночастиц серебра равен 5 нм.

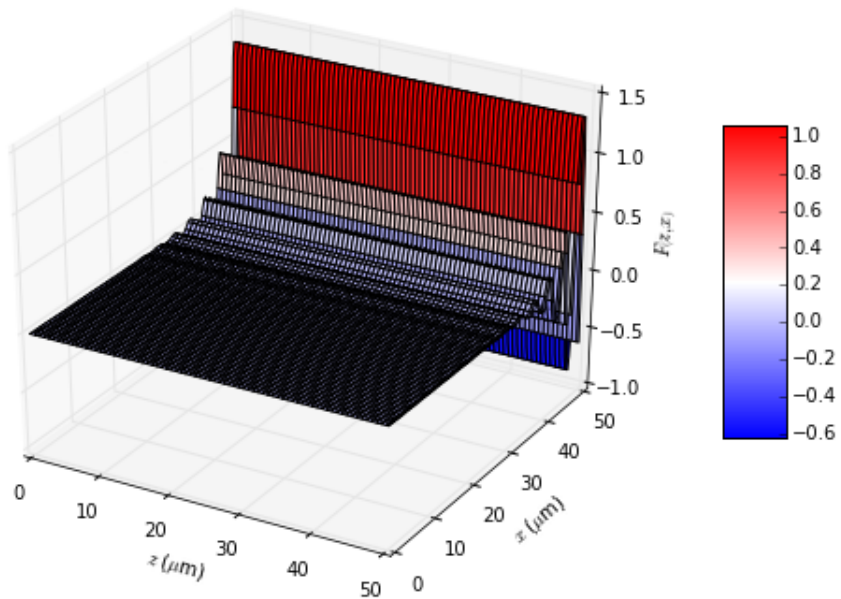


Рис. 2. Зависимость действительной части силы (9) от координат z и x на длине волны излучения, равной $\lambda = 415$ нм. Фактор заполнения среды наночастицами составляет 3%. Средний радиус наночастиц серебра равен 5 нм.

На рис. 1 изображён график зависимости действительной части силы (9) от координат z и x на длине волны излучения, равной $\lambda = 405$ нм, с фактором заполнения среды наночастицами, составляющим 3%, средним радиусом наночастиц серебра, равным 5 нм.

На рис. 2 изображён график зависимости действительной части силы (9) от координат z и x на длине волны излучения, равной $\lambda = 415$ нм, с фактором заполнения среды наночастицами, составляющим 3%, радиусом наночастиц серебра, равным 5 нм.

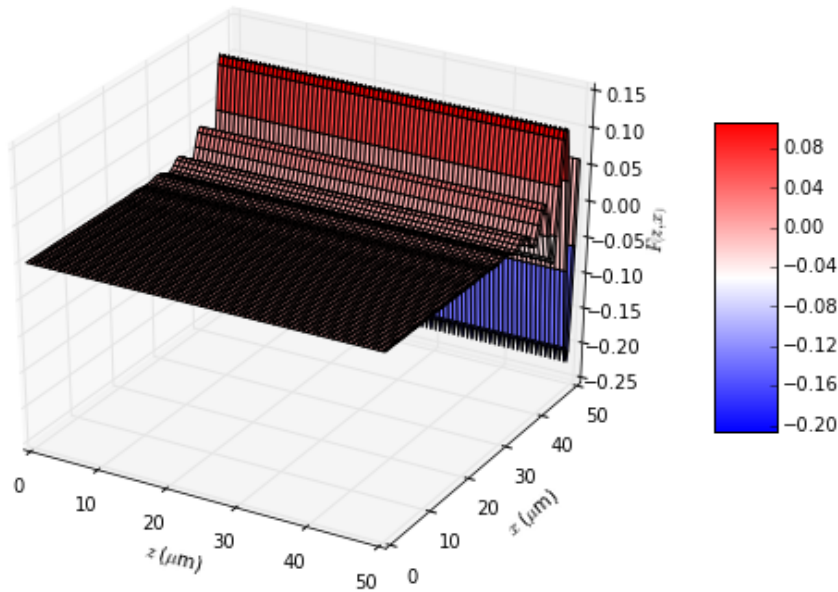


Рис. 3. Зависимость действительной части силы (9) от координат z и x на длине волны излучения, равной $\lambda = 425$ нм. Фактор заполнения среды наночастицами составляет 3%. Средний радиус наночастиц серебра равен 5 нм.

На рис. 3 изображён график зависимости действительной части силы (9) от координат z и x на длине волны излучения, равной $\lambda = 425$ нм, с фактором заполнения среды наночастицами, составляющим 3%, средним радиусом наночастиц серебра, равным 5 нм. Матрицей нанокompозитной среды является глицерин.

Заключение

Изучение пондеромоторных сил в наноструктурах подтвердило их большую роль в современных технологиях. Полученные результаты позволяют утверждать, что пондеромоторные силы могут быть использованы для создания высокоэффективных сенсоров на основе наноразмерных элементов из композитных материалов. Исследование физических свойств пондеромоторных сил в композитных наноструктурах показало, что пондеромоторные силы в наноструктурах могут быть использованы для управления движением наночастиц.

Численное исследование показало, что физические свойства пондеромоторных сил в наноструктурах зависят от различных факторов, в том числе от геометрического размера наночастиц, материала наноразмерных включений.

Гипотеза исследования о том, что пондеромоторные силы в наноструктурах могут быть использованы для управления движением наночастиц и пондеромоторные силы играют важную роль в управлении движением заряженных частиц в лазерных полях, была подтверждена результатами исследования.

Теоретическая значимость исследования состояла в изучении физических свойств пондеромоторных сил в наноструктурах. Результаты исследования показали, что физические свойства пондеромоторных сил в наноструктурах зависят от различных факторов, в том числе от размера наноструктур, их формы, материала. Развита новые представления о взаимодействии заряженных частиц с лазерными полями различной конфигурации, что привело к открытию новых закономерностей и пониманию фундаментальных законов физики. Практическая значимость исследования состояла в применении пондеромоторных сил в наноструктурах в технологических процессах.

Результаты исследования показали, что пондеромоторные силы в наноструктурах могут быть использованы для управления движением наночастиц. Результаты исследования могут способствовать развитию новых методов управления заряженными частицами и созданию более эффективных устройств и систем, основанных на использовании пондеромоторных сил в наноструктурах. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методов управления движением заряженных частиц и создания более эффективных устройств и систем на основе охлаждения и локализации атомов и молекул, основанных на использовании пондеромоторных сил в наноструктурах. Пондеромоторные силы в наноструктурах могут быть использованы в технологических процессах, например, для управления движением наночастиц с использованием пондеромоторных сил. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации параметров наноструктур.

Список использованных источников

1. Lozovski Valeri, Lysenko Volodymyr, Rusinchuk Natalia. Ponderomotive forces in the system of two nanoparticles // Scientific reports. — 2022. — oct. — Vol. 12, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-22510-8>.
2. Muskens Otto. Towards nanoantenna electron switches // Annalen der physik. — 2013. — feb. — Vol. 525, no. 1–2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ANDP.201300706>.
3. Nozariasbmarz Amin, Hosseini Mahshid, Vashae Daryoosh. Interfacial ponderomotive force in solids leads to field induced dissolution of materials and formation of non-equilibrium nanocomposites // Acta Materialia. — 2019. — oct. — Vol. 179. — P. 85–92. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2019.08.017>.
4. Nonadiabatic ponderomotive effects in photoemission from nanotips in intense midinfrared laser fields / J. Schötz [et al.] // Physical Review A. — 2018. — jan. — Vol. 97, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVA.97.013413>.
5. Ginzburg P., Hayat A., Orenstein M. Ponderomotive force - the fundamental nonlinearity in plasmonics // CLEO/Europe - EQEC 2009 - European conference on lasers and electro-optics and the European quantum electronics conference. — IEEE, 2009. — jun. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2009.5191560>.
6. Bormashov V. S., Sheshin E. P. Ponderomotive force effect on the long-term stability of field emission cathode based on nanocarbon materials // 2006 19th International vacuum nanoelectronics conference. — IEEE, 2006. — jul. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/IVNC.2006.335431>.
7. Ponderomotive forces effect on the field emission of carbon nanotube films / O. E. Glukhova [et al.] // Applied surface science. — 2003. — jun. — Vol. 215, no. 1–4. — P. 149–159. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00279-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00279-4).
8. The role of the ponderomotive force in high field experiments / Luis Roso [et al.] // Progress in ultrafast intense laser science XVI. — Springer International Publishing, 2021. — P. 149–177. — ISBN: 9783030750893. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-75089-3_8.
9. Observations on the ponderomotive force / D. A. Burton [et al.] // Relativistic plasma waves and particle beams as coherent and incoherent radiation sources II / Ed. by

- Dino A. Jaroszynski. — SPIE, 2017. — may. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2270542>.
10. Dodin I. Y., Fisch N. J. Particle manipulation with nonadiabatic ponderomotive forces // AIP Conference proceedings. — Vol. 926. — AIP, 2007. — P. 149–151. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2768846>.
 11. Khazanov G. V., Krivorutsky E. N. Ponderomotive force in the presence of electric fields // Physics of plasmas. — 2013. — feb. — Vol. 20, no. 2. — P. 022903. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4789874>.
 12. Ponderomotive force due to the intrinsic spin in extended fluid and kinetic models / Martin Stefan [et al.] // Physical Review E. — 2011. — mar. — Vol. 83, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVE.83.036410>.
 13. Cox Graham, Levi Mark. The ponderomotive Lorentz force // Nonlinearity. — 2020. — jun. — Vol. 33, no. 8. — P. 4030–4045. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6544/AB7D29>.
 14. Mori W. B., Katsouleas T. Ponderomotive force of a uniform electromagnetic wave in a time varying dielectric medium // Physical Review Letters. — 1992. — dec. — Vol. 69, no. 24. — P. 3495–3498. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.69.3495>.

Сведения об авторах:

Вероника Васильевна Левочкина — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: sokolovavasilevna2002@inbox.ru

ORCID iD  0000-0003-3479-119X

Web of Science ResearcherID  AGV-8078-2022

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 260.2110
MSC 78A10

Investigation of physical properties of ponderomotive forces in nanostructures

V. V. Levochkina 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted September 23, 2024

Resubmitted September 25, 2024

Published December 28, 2024

Abstract. The results of the study of physical properties of ponderomotive forces in nanostructures are presented. There is a need to understand the mechanisms of interaction of electromagnetic fields with nanostructures for the development of optomechanical devices and instruments. The research methods include theoretical calculations and computer modeling of the interaction of electromagnetic fields with nanostructures taking into account ponderomotive forces. New ideas about the influence of the geometry of nanostructures on the characteristics of ponderomotive forces, as well as the development of approaches to control ponderomotive forces are obtained. The practical significance of the study lies in the possibility of using the obtained results to create effective nanodevices and systems, such as sensors.

Keywords: nanostructure, force, ponderomotive force, nanoparticle, electromagnetic field, local field enhancement, local field gradient, decaying near field

References


1. Lozovski Valeri, Lysenko Volodymyr, Rusinchuk Natalia. Ponderomotive forces in the system of two nanoparticles // Scientific reports. — 2022. — oct. — Vol. 12, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-22510-8>.
2. Muskens Otto. Towards nanoantenna electron switches // Annalen der physik. — 2013. — feb. — Vol. 525, no. 1–2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ANDP.201300706>.
3. Nozariasbmarz Amin, Hosseini Mahshid, Vashaee Daryoosh. Interfacial ponderomotive force in solids leads to field induced dissolution of materials and formation of non-equilibrium nanocomposites // Acta Materialia. — 2019. — oct. — Vol. 179. — P. 85–92. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2019.08.017>.
4. Nonadiabatic ponderomotive effects in photoemission from nanotips in intense midinfrared laser fields / J. Schötz [et al.] // Physical Review A. — 2018. — jan. — Vol. 97, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVA.97.013413>.


5. Ginzburg P., Hayat A., Orenstein M. Ponderomotive force - the fundamental nonlinearity in plasmonics // CLEO/Europe - EQEC 2009 - European conference on lasers and electro-optics and the European quantum electronics conference. — IEEE, 2009. — jun. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2009.5191560>.
6. Bormashov V. S., Sheshin E. P. Ponderomotive force effect on the long-term stability of field emission cathode based on nanocarbon materials // 2006 19th International vacuum nanoelectronics conference. — IEEE, 2006. — jul. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/IVNC.2006.335431>.
7. Ponderomotive forces effect on the field emission of carbon nanotube films / O. E. Glukhova [et al.] // Applied surface science. — 2003. — jun. — Vol. 215, no. 1–4. — P. 149–159. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00279-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00279-4).
8. The role of the ponderomotive force in high field experiments / Luis Roso [et al.] // Progress in ultrafast intense laser science XVI. — Springer International Publishing, 2021. — P. 149–177. — ISBN: 9783030750893. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-75089-3_8.
9. Observations on the ponderomotive force / D. A. Burton [et al.] // Relativistic plasma waves and particle beams as coherent and incoherent radiation sources II / Ed. by Dino A. Jaroszynski. — SPIE, 2017. — may. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2270542>.
10. Dodin I. Y., Fisch N. J. Particle manipulation with nonadiabatic ponderomotive forces // AIP Conference proceedings. — Vol. 926. — AIP, 2007. — P. 149–151. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2768846>.
11. Khazanov G. V., Krivorutsky E. N. Ponderomotive force in the presence of electric fields // Physics of plasmas. — 2013. — feb. — Vol. 20, no. 2. — P. 022903. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4789874>.
12. Ponderomotive force due to the intrinsic spin in extended fluid and kinetic models / Martin Stefan [et al.] // Physical Review E. — 2011. — mar. — Vol. 83, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVE.83.036410>.
13. Cox Graham, Levi Mark. The ponderomotive Lorentz force // Nonlinearity. — 2020. — jun. — Vol. 33, no. 8. — P. 4030–4045. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6544/AB7D29>.
14. Mori W. B., Katsouleas T. Ponderomotive force of a uniform electromagnetic wave in a time varying dielectric medium // Physical Review Letters. — 1992. — dec. — Vol. 69, no. 24. — P. 3495–3498. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.69.3495>.

Information about authors:

Veronika Vasilievna Levochkina — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: sokolovavasilevna2002@inbox.ru

ORCID iD  0000-0003-3479-119X

Web of Science ResearcherID  AGV-8078-2022