

Секция 2

Физико-математические науки

УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 01.04.05

Исследование оптического излучения нанокластеров

К. К. Алтунин , А. А. Лебедев  ¹

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

Поступила в редакцию 16 февраля 2022 года
После переработки 25 февраля 2022 года
Опубликована 5 марта 2022 года

Аннотация. Исследованы некоторые физические свойства оптического излучения нанокластеров. Разработана теоретическая модель оптического излучения нанокластеров на основе приближения эффективной среды с использованием выражения эффективной поляризуемости нанокластеров, состоящих из металлических наночастиц. Установлена зависимость нормированной интенсивности излучения нанокластера из сферических наночастиц серебра от длины волны оптического излучения. Показано, что интенсивность электрического дипольного излучения нанокластера при определённой структуре расположения атомов может значительно увеличиться по сравнению с интенсивностью излучения изолированного атома, благодаря межатомному взаимодействию.

Ключевые слова: оптическое излучение, нанокластер, кластер, наночастица, интенсивность, наноструктуры с нанокластерами, светоизлучающие наноструктуры

PACS: 42.70.-a

¹E-mail: alexjek73@gmail.com

Введение

В настоящее время возрастает интерес к фундаментальным исследованиям наносистем с нанокластерами в связи с интенсивным развитием технологии получения наноструктур с нанокластерами. На основе наноструктур, содержащих нанокластеры из металлических наночастиц, создаются высокоэффективные светоизлучающие наноструктуры для новых наноразмерных оптоэлектронных приборов.

Целью работы является исследование оптических характеристик нанокластера из металлических наночастиц на границе раздела двух сред.

В связи с поставленной целью сформулированы следующие задачи:

1. провести анализ научной литературы и написать обзор работ по физическим свойствам нанокластеров из металлических наночастиц,
2. разработать последовательную теорию оптических процессов в нанокластерах из металлических наночастиц, провести исследование оптических свойств нанокластеров из металлических наночастиц,
3. провести численное исследование оптических характеристик нанокластеров из металлических наночастиц и рассчитать эффективную поляризуемость нанокластера при помощи компьютерных методов.

Объектом исследования является нанокластер с известным содержанием металлических наночастиц.

Предметом исследования является совокупность оптических процессов в металлических нанокластерах.

Гипотеза исследования состоит, что если использовать современные методы компьютерных вычислений в физике нанокластеров, то можно вычислить относительную интенсивность нанокластеров из металлических наночастиц.

Методами исследования являются теоретические и численные методы классической, нелинейной и квантовой оптики нанокластеров и кластерных наносистем. В качестве материалов исследования выбраны среды, содержащие нанокластеры из металлических наночастиц.

Обзор работ по оптическим свойствам нанокластеров

В статье [1] описано перерасcеяние электронами на классических траекториях, имеющее центральное значение для понимания излучения фотоэлектронов и высоких гармоник изолированных атомов или молекул в интенсивных лазерных импульсах. Управляя размером кластера и амплитудой колебаний электронов, продемонстрировано, как перерасcеяние влияет на энергетическое распределение фотоэлектронов, испускаемых нанокластерами инертных газов. Обнаружена универсальная зависимость распределения энергии фотоэлектронов от размера кластера при масштабировании по экскурсиям электронов, управляемой полем, устанавливая единую картину перерасcеяния для протяженных систем с известной атомной динамикой как пределом нулевого расширения. Результат поддерживается расcётами молекулярной динамики и рационализируется с помощью одномерной классической модели.

Режимы излучения тесно связаны со многими физическими свойствами нанокластеров. Однако за десятилетия исследований не удалось сформулировать общего и однозначного определения. В статье [2] представлено простое и широко применимое определение режимов излучения, основанное на спектрах мощности геометрических величин, а именно площади поверхности, объёма. Применяя теорию групп, анализ нормальных режимов и моделирование молекулярной динамики, исследованы режимы излучения нескольких кластеров алюминия с высокой и низкой симметрией. Результаты показывают, что определение может охватывать не только обычные режимы дыхания, но и

некоторые скрытые режимы. Последовательное определение также позволяет нам провести всестороннее и глубокое сравнение с моделью непрерывной среды Лэмба, которая показывает, что некоторые высокочастотные режимы дыхания можно объяснить только на атомном уровне.

Межатомный потенциал играет ключевую роль в обеспечении точности и надежности результатов молекулярно-динамического моделирования. В то время как большинство эмпирических потенциалов сравниваются с набором тщательно отобранных свойств объемного материала, недавние достижения в области машинного обучения привели к появлению математических потенциалов на основе нейронных сетей, способных описывать очень сложные поверхности потенциальной энергии для различных систем. В статье [3] сообщается о разработке межатомного потенциала нейронной сети с модифицированной фоновой плотностью метода встроеного атома в качестве функций отпечатков пальцев, которые могут точно моделировать энергетику металлических наночастиц и кластеров (кластеров меди в качестве типичного примера), широко используемых в катализе. Для надлежащего учёта разнообразных химических сред, встречающихся в наночастицах и нанокластерах, был рассчитан обширный набор атомных конфигураций (всего 18084) с использованием теории функционала плотности на уровне Пердью–Берка–Эрнзергофа. В дополнение к стандартным объемным свойствам, таким как энергии когезии и константы упругости, выбранные конфигурации также включают значительное количество по-разному ориентированных кристаллических граней и наночастиц и нанокластеров разного размера, что значительно расширяет диапазон значений межатомных потенциалов нейронной сети, который в противном случае был бы довольно значительным. ограничено. Сложная потенциальная поверхность энергии меди может быть точно воспроизведена со средней ошибкой 0.011 эВ на атом для энергетических состояний в пределах 3 эВ от основного состояния. В качестве иллюстрации, разработанная нейронная сеть межатомных потенциалов используется для моделирования молекулярной динамики наночастиц меди, и достигается хорошее согласие между теорией функционала плотности и нейронной сетью межатомных потенциалов.

Режимы релаксации — это коллективные режимы, в которых все отклонения вероятности от равновесных состояний затухают с одинаковыми скоростями релаксации. Напротив, время первого перехода — это время, необходимое для первого перехода из одного состояния в другое. В статье [4] обсуждается, как и почему самые медленные скорости релаксации мод релаксации восстанавливаются по временам первого прохождения. В качестве иллюстративной модели использована марковская модель диффузии вакансий с непрерывным временем в нанокластерах из КСl. Используя эту модель, обнаружено, что все характеристики релаксаций в нанокластерах из КСl обусловлены тем, что они являются гибридами двух кинетически различных областей быстрой поверхностной и медленной объемной диффузии. Происхождение различных коэффициентов диффузии, как выясняется, связано с неоднородностью энергий активации на ландшафтах потенциальной энергии. Разработан метод для вычисления среднего времени первого прохождения как среднего времени, необходимого для парной аннигиляции пар частицы и дырки, что позволяет нам получать симметричные результаты скоростей релаксации при обмене стоками и источниками. С помощью этого симметричного метода, наконец, показано, почему самые медленные времена релаксации могут быть восстановлены из средних времен первого прохождения.

В статьях [5, 6] рассматривались особенности оптического излучения нанокластера из двух атомов. Эффект гигантского усиления внешнего оптического излучения непрерывной накачки в нанокластере был описан в работе [5]. В серии работ [7–11] были теоретически исследованы нанокластеры в области линейных и нелинейных оптических размерных резонансов с использованием теории эффективной поляризуемости.

Теоретическая модель

Рассмотрим теоретическую модель для вычисления интенсивности излучения системы нанокластеров в нанокompозитной плёнке. Эффективный показатель преломления нанокompозитной плёнки, содержащий включения в виде нанокластеров, находится по формуле

$$\frac{n_j^2 - 1}{n_j^2 + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} (N_m \alpha_m - w N_j \alpha_j) , \quad (1)$$

где N_m – концентрация валентных электронов в матрице нанокompозитной плёнки, α_m – коэффициент поляризуемости атомов матрицы нанокompозитной плёнки, N_j – концентрация валентных электронов в нанокластерах внутри нанокompозитной плёнки, α_{effj} – коэффициент поляризуемости атомов в нанокластерах внутри нанокompозитной плёнки, w – инверсия атомов в нанокластерах внутри нанокompозитной плёнки.

В приближении действующего поля вектор напряжённости результирующего поля электромагнитной волны в месте расположения атома наблюдателя находится по формуле:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_{0I}(\mathbf{r}) \exp(-i\omega t) + \frac{4\pi}{3} a^3 k_0^3 \frac{(N_m \alpha_m + N_j \alpha_j)}{1 - a_{Tj} (N_m \alpha_m + N_j \alpha_j)} \frac{\exp(ik_0 r)}{r} \times \\ \times \exp(-i\omega t) (\mathbf{E}_{0I}(\mathbf{r}) - (\mathbf{E}_{0I}(\mathbf{r}) \mathbf{n}) \mathbf{n}) , \quad (2)$$

где $k_0 = \omega/c$, $\mathbf{n} = \mathbf{r}/r$. В этом уравнении учтено выражение напряжённости электрического поля в центре сферического нанокластера

$$\mathbf{E}_0(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{E}_{0I}(\mathbf{r})}{1 - a_{Tj} (N_m \alpha_m + N_j \alpha_j)} . \quad (3)$$

Внутренний геометрический фактор находится из выражения

$$a_{Tj} = \frac{4\pi}{3} \left(1 - \exp(ik_0 a_j) \left(\cos(k_0 n_j a_j) + (1 + ik_0 a_j) \frac{\sin(k_0 n_j a_j)}{k_0 n_j a_j} \right) \right) . \quad (4)$$

Другие геометрические факторы находятся из выражений

$$a_{Rj}^x = \frac{4\pi}{3} a_j^3 \left(\frac{2}{R_{12}^3} - i \frac{2k_0}{R_{12}^2} \right) , \quad (5)$$

$$a_{Rj}^{y,z} = \frac{4\pi}{3} a_j^3 \left(-\frac{1}{R_{12}^3} + i \frac{k_0}{R_{12}^2} + \frac{k_0^2}{R_{12}} \right) . \quad (6)$$

Для системы двух сферических нанокластеров, находящихся в нанокompозитной плёнке, выражения коэффициентов эффективных поляризуемостей имеют вид:

$$\alpha_{eff1}^m = -\frac{w_1 \alpha_1 ((a_{T1} b_1 - 1) - a_{R2}^m b_2 \exp(-i\mathbf{k}_0 \mathbf{R}_{12}) \exp(ik_0 R_{12}))}{\exp(i2k_0 R_{12}) a_{R1}^m a_{R2}^m b_1 b_2 - (a_{T1} b_1 - 1) (a_{T2} b_2 - 1)} , \quad (7)$$

$$\alpha_{eff2}^m = -\frac{w_2 \alpha_2 ((a_{T2} b_2 - 1) - a_{R1}^m b_1 \exp(-i\mathbf{k}_0 \mathbf{R}_{12}) \exp(ik_0 R_{12}))}{\exp(i2k_0 R_{12}) a_{R1}^m a_{R2}^m b_1 b_2 - (a_{T1} b_1 - 1) (a_{T2} b_2 - 1)} . \quad (8)$$

Дифференциальная интенсивность системы нанокластеров в нанокompозитной плёнке имеет вид

$$dI = \frac{1}{2} \text{Re}((E_{\theta 1} + E_{\theta 2})(H_{\psi 1} + H_{\psi 2})^*) 2\pi R_1^2 \sin \theta_1 d \sin \theta_1 . \quad (9)$$

Компоненты результирующей напряжённости поля излучения электромагнитной волны находятся из выражений:

$$E_{\theta_1} = \frac{1}{2} \alpha_{\text{eff}j}^z \exp(ik_0 R_1) \left(\frac{1}{R_1^3} - i \frac{k_0}{R_1^2} - \frac{k_0^2}{R_1} \right) \sin \theta_1, \quad (10)$$

$$H_{\psi_1} = \frac{1}{2} \alpha_{\text{eff}j}^z \exp(ik_0 R_1) \left(-i \frac{k_0}{R_1^2} - \frac{k_0^2}{R_1} \right) \sin \theta_1, \quad (11)$$

$$E_{\theta_2} = \frac{1}{2} \alpha_{\text{eff}j}^z \exp(ik_0 R_2) \left(\frac{1}{R_2^3} - i \frac{k_0}{R_2^2} - \frac{k_0^2}{R_2} \right) \sin \theta_1, \quad (12)$$

$$H_{\psi_2} = \frac{1}{2} \alpha_{\text{eff}j}^z \exp(ik_0 R_2) \left(-i \frac{k_0}{R_2^2} - \frac{k_0^2}{R_2} \right) \sin \theta_1. \quad (13)$$

Результаты численных расчётов

Теория излучения нанокластеров во многих случаях строится на теории Ми, которая приводит к трудоёмким вычислениям, включающим суммирование рядов, содержащих слагаемые, в которые входят специальные функции.

Если наносистема состоит из нескольких нанокластеров или наносистема представляет собой наноккомпозит с включениями из нанокластеров, то производить расчёты по теории Ми без привлечения суперкомпьютеров представляется технически не возможным.

В работе предлагается использовать теорию излучения нанокластеров на основе квантовой теории эффективной поляризуемости. Квантовая теория излучения нанокластеров позволяет учесть спектральные закономерности в энергетическом спектре системы из взаимодействующих кластеров, состоящих из системы металлических наночастиц.

Для наноккомпозитных сред с нанокластерами необходимо использовать приближение эффективной среды. В приближении эффективной среды эффективная поляризуемость нанокластера вычисляется через квантовую поляризуемость атомного электрона. В выражение эффективной поляризуемости нанокластера входит концентрация валентных электронов в нанокластере и внешний геометрический фактор. По выражению эффективной поляризуемости одиночного нанокластера можно вычислить эффективную поляризуемость системы нанокластеров. Если знаем эффективную поляризуемость системы нанокластеров, то можно вычислить эффективный показатель преломления системы нанокластеров по формуле Лорентц-Лоренца. Если знаем эффективный показатель преломления системы нанокластеров, то можно вычислить эффективный показатель преломления наноккомпозитной плёнки с включениями нанокластеров по одной из формул смешения.

На рис. 1 представлено изображение первой части компьютерной программы, написанной на языке программирования Python для расчёта характеристик нанокластера. На рис. 2 представлено изображение второй части компьютерной программы, написанной на языке программирования Python для расчёта характеристик нанокластера.

Рассмотрим результаты численных расчётов интенсивности излучения нанокластера.

На рис. 3 представлено изображение зависимости нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 7$ нм от длины волны оптического излучения.

На рис. 4 представлено изображение зависимости нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 12$ нм от длины волны оптического излучения.

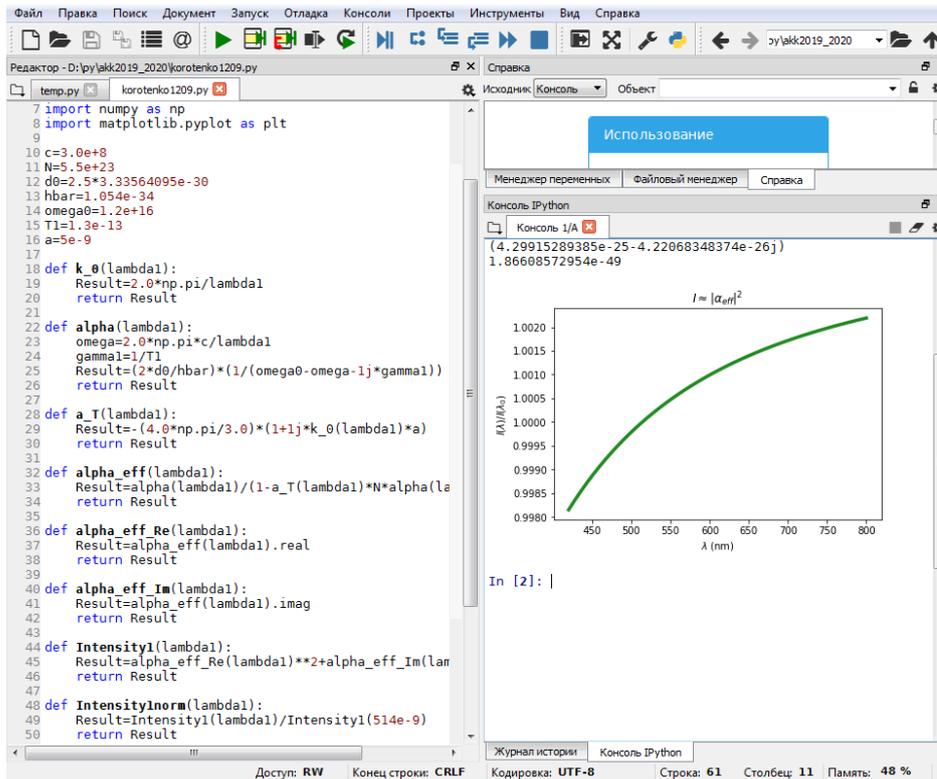


Рис. 1. Первая часть программы для ЭВМ на языке программирования Python для расчёта характеристик оптического излучения нанокластера.

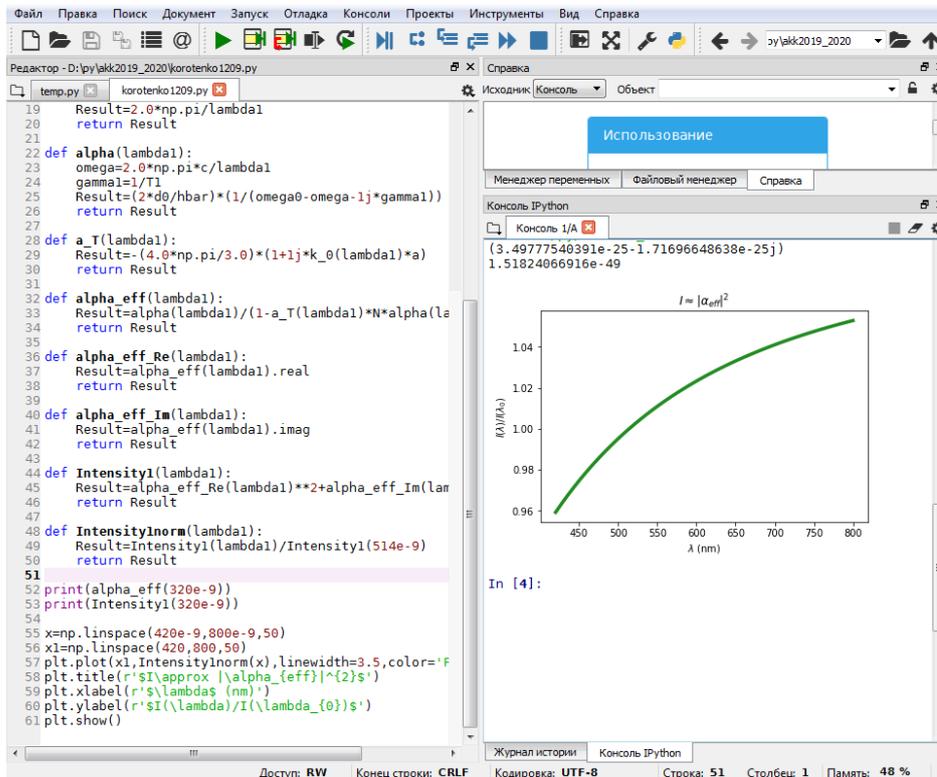


Рис. 2. Вторая часть программы для ЭВМ на языке программирования Python для расчёта характеристик оптического излучения нанокластера.

На рис. 5 представлено изображение зависимости нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 17$ нм от длины волны оп-

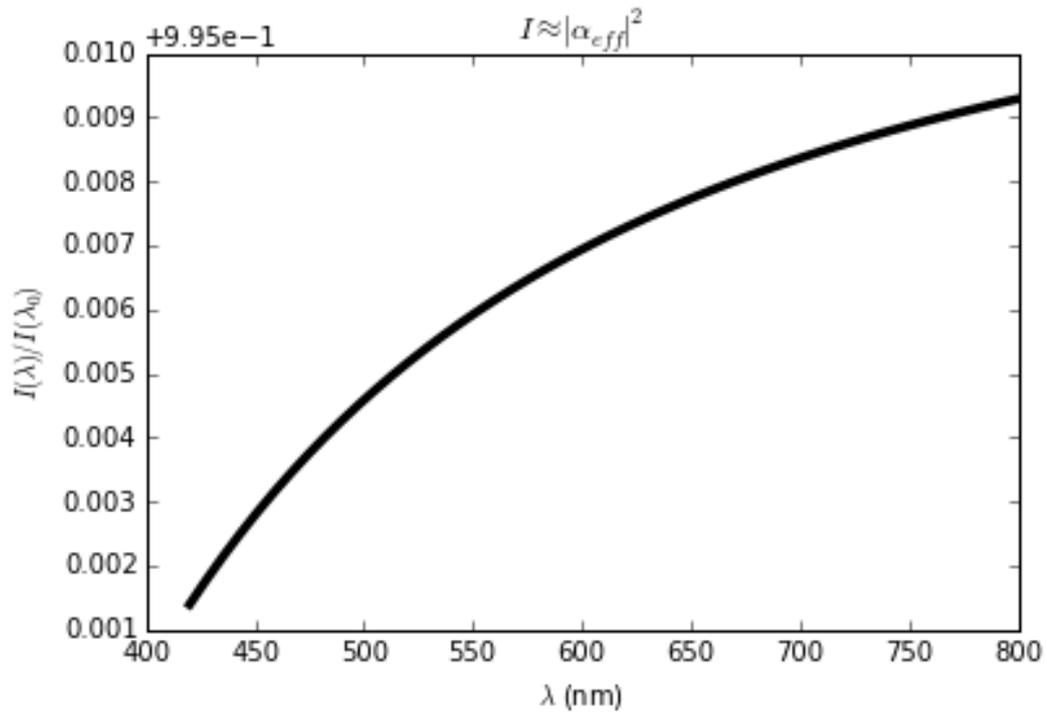


Рис. 3. Зависимость нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 7$ нм от длины волны оптического излучения.

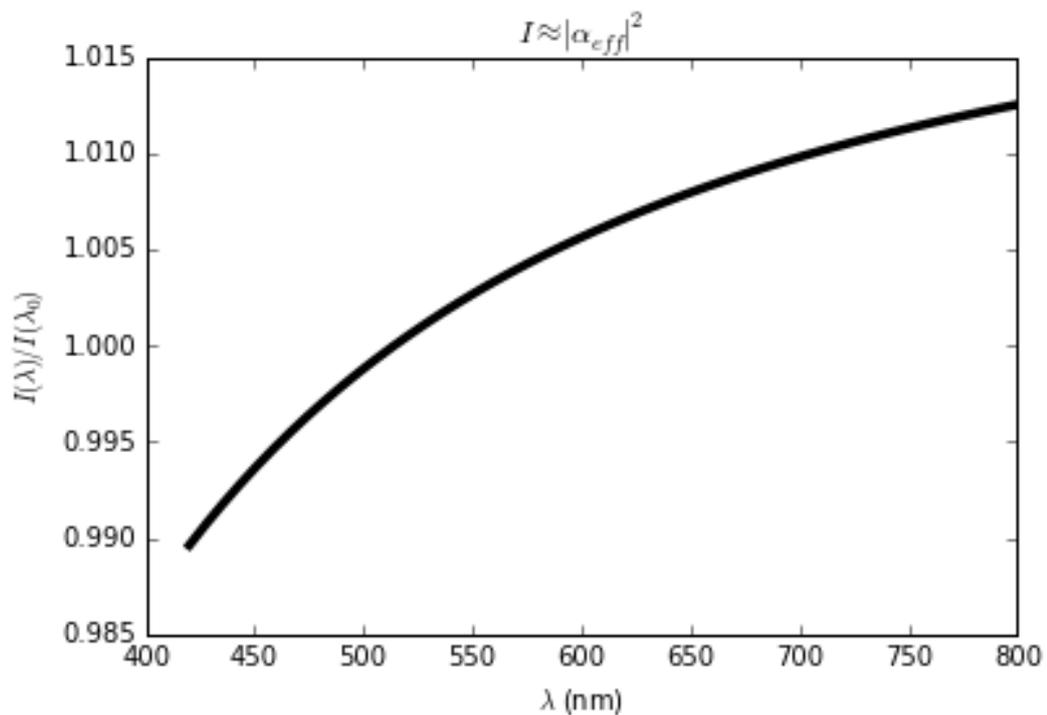


Рис. 4. Зависимость нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 12$ нм от длины волны оптического излучения.

тического излучения.

На рис. 6 представлено изображение зависимости нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 22$ нм от длины волны оптического излучения.

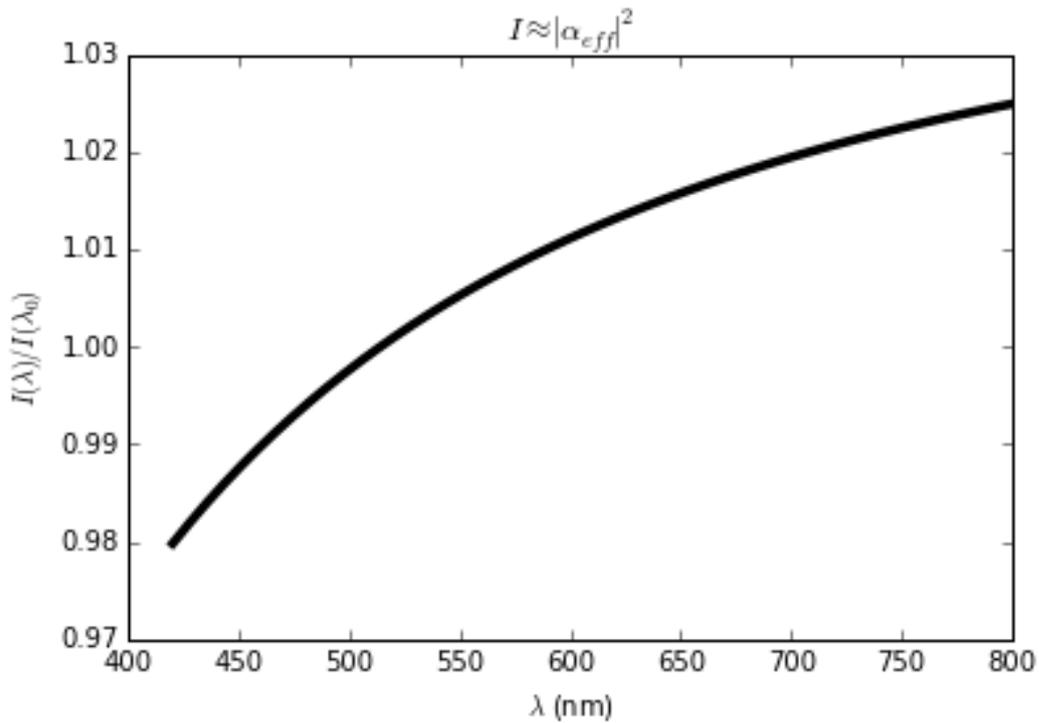


Рис. 5. Зависимость нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 17$ нм от длины волны оптического излучения.

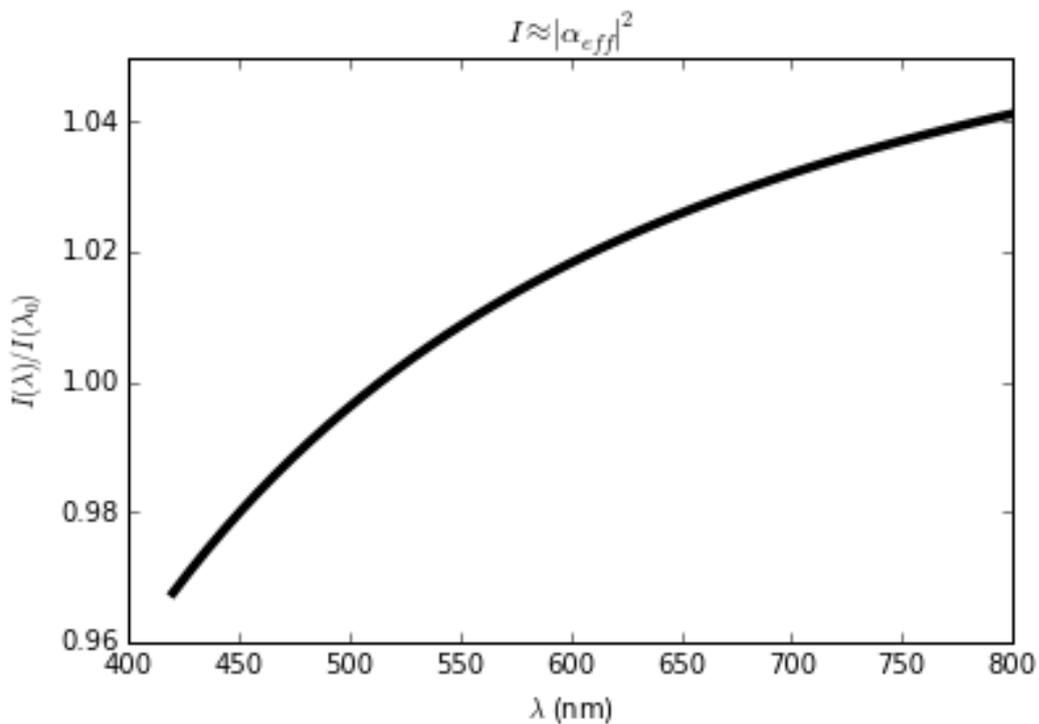


Рис. 6. Зависимость нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 22$ нм от длины волны оптического излучения.

На рис. 7 представлено изображение зависимости нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 27$ нм от длины волны оптического излучения. На рис. 8 представлено изображение зависимости нормированной

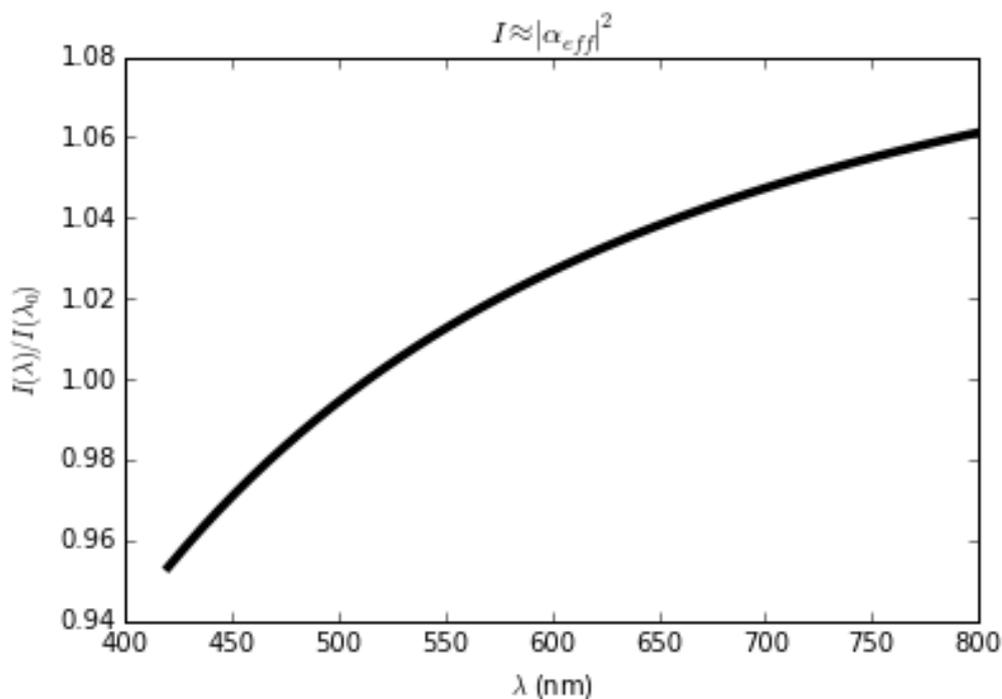


Рис. 7. Зависимость нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 27$ нм от длины волны оптического излучения.

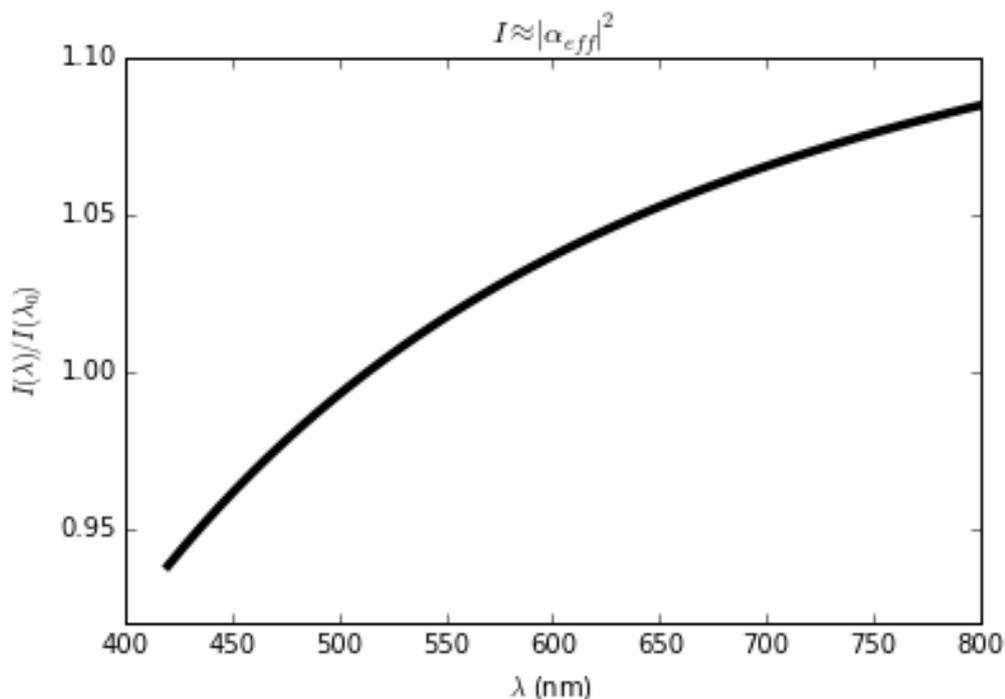


Рис. 8. Зависимость нормированной интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 32$ нм от длины волны оптического излучения.

интенсивности излучения нанокластера из наночастиц серебра радиусом $a = 32$ нм от длины волны оптического излучения. Численные расчёты относительной интенсивности излучения нанокластера показывают широкополосное усиление оптического излучения нанокластером в условиях непрерывной накачки лазерным излучением.

Заключение

В настоящей работе проведено всестороннее исследование физических характеристик нанокластерных сред с нанокластерами. В работе исследованы оптические характеристики системы нанокластеров, состоящих из металлических наночастиц, расположенных на границе раздела двух сред.

В работе проведены численные расчёты относительной интенсивности излучения нанокластера, которые показывают широкополосное усиление оптического излучения нанокластером в условиях непрерывной накачки лазерным излучением.

Оптические свойства наночастиц и нанокластеров из наночастиц важны как для традиционных, так и для новых технологий. Наночастицы уже давно используются в качестве красителей в стекле и красках. Исследования в области оптики наночастиц резко возросли в 1970-х годах из-за возросшего интереса общества к применению солнечной энергии. Сегодня металлические наночастицы используются в коммерческих покрытиях, которые поглощают на определённых длинах волн оптического излучения. В последнее время оптическое поглощение наночастиц благородных металлов было использовано в качестве основы для новых датчиков: усиленные локальные поля вблизи поверхностей частиц позволяют обнаруживать отдельные молекулы с помощью поверхностной спектроскопии. При проектировании оптических покрытий крайне важно иметь точные модели их оптических свойств. Покрытия на основе наночастиц могут быть оптимизированы для конкретных применений путём изменения их размера частиц, формы, объёмной доли, микроструктуры. Поскольку оптика наночастиц является сложным предметом, в различных ситуациях необходимы разные классы моделей. В настоящее время разработан полный набор рабочих моделей для субмикронных частиц, встроенных в поддерживающие среды.

Разработана теория оптического излучения нанокластеров на основе приближения эффективной среды с использованием выражения эффективной поляризуемости нанокластеров, состоящих из наночастиц. Установлена зависимость нормированной интенсивности излучения нанокластера из сферических наночастиц серебра от длины волны оптического излучения. Показано, что интенсивность электрического дипольного излучения нанокластера при определённой структуре расположения атомов может значительно увеличиться по сравнению с интенсивностью излучения изолированного атома, благодаря межатомному взаимодействию.

Список использованных источников

1. Universal High-Energy Photoelectron Emission from Nanoclusters Beyond the Atomic Limit / Zhou Wang [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2020. — apr. — Vol. 124, no. 17. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.124.173201>.
2. Lan B., Sun D. Y. Breathing mode of nanoclusters: Definition and comparison to a continuous medium model // *Physical Review B*. — 2021. — apr. — Vol. 103, no. 13. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.103.134108>.
3. Modeling of metal nanoparticles: Development of neural-network interatomic potential inspired by features of the modified embedded-atom method / Feifeng Wu [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 14. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.144107>.
4. Mean first passage times reconstruct the slowest relaxations in potential energy landscapes of nanoclusters / Teruaki Okushima [et al.] // *Physical Review E*. — 2019. — sep. — Vol. 100, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.100.032311>.

5. Gadomsky O. N., Gadomskaya I. V., Altunin K. K. Giant enhancement of light in atomic clusters // JETP Letters. — 2009. — oct. — Vol. 90, no. 4. — P. 244–250. — URL: <https://doi.org/10.1134/s002136400916005x>.
6. Giant photovoltaic effect / O. N. Gadomsky [et al.] // JETP Letters. — 2011. — may. — Vol. 93, no. 6. — P. 320–325. — URL: <https://doi.org/10.1134/s002136401106004x>.
7. Gadomsky O. N., Idiatullov T. T. Optical size resonances in nanostructures // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2001. — jun. — Vol. 92, no. 6. — P. 1060–1071. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.1385648>.
8. Gadomsky O. N., Kadochkin A. S. Boundary-value problems in near-field optical microscopy and optical size resonances // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2003. — sep. — Vol. 97, no. 3. — P. 466–478. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.1618333>.
9. Gadomskii O. N., Abramov Yu. V. Nonlinear steady-state sized resonances in diatomic nanostructural objects // Optics and Spectroscopy. — 2002. — dec. — Vol. 93, no. 6. — P. 879–884. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.1531711>.
10. Gadomskii O. N., Abramov Yu. V. Linear nonstationary optical dimensional resonances in atomic nanostructures // Optics and Spectroscopy. — 2002. — jul. — Vol. 93, no. 1. — P. 61–68. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.1496725>.
11. Gadomsky O. N., Glukhov A. G. Nonlinear resonances in the near-field interaction between atoms // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2006. — jul. — Vol. 103, no. 1. — P. 23–34. — URL: <https://doi.org/10.1134/s106377610607003x>.

Сведения об авторах:

Константин Константинович Алтунин — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: kostya_altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

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

E-mail: alexjek73@gmail.com

ORCID iD  0000-0002-0432-6409

Web of Science ResearcherID  AFN-9300-2022

Investigation of optical emission of nanoclusters

A. A. Lebedev , K. K. Altunin 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted February 16, 2022

Resubmitted February 25, 2022

Published March 5, 2022

Abstract. Some physical properties of the optical emission of nanoclusters are investigated. A theoretical model of the optical emission of nanoclusters has been developed based on the effective medium approximation using the expression for the effective polarizability of nanoclusters consisting of metallic nanoparticles. The dependence of the normalized radiation intensity of a nanocluster of spherical silver nanoparticles on the wavelength of optical emission has been established. It is shown that the intensity of the electric dipole radiation of a nanocluster with a certain structure of the arrangement of atoms can significantly increase compared to the intensity of the optical emission of an isolated atom due to interatomic interaction.

Keywords: optical emission, nanocluster, cluster, nanoparticle, intensity, nanostructures with nanoclusters, light-emitting nanostructures

PACS: 42.70.-a

References

1. Universal High-Energy Photoelectron Emission from Nanoclusters Beyond the Atomic Limit / Zhou Wang [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2020. — apr. — Vol. 124, no. 17. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.124.173201>.
2. Lan B., Sun D. Y. Breathing mode of nanoclusters: Definition and comparison to a continuous medium model // *Physical Review B*. — 2021. — apr. — Vol. 103, no. 13. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.103.134108>.
3. Modeling of metal nanoparticles: Development of neural-network interatomic potential inspired by features of the modified embedded-atom method / Feifeng Wu [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 14. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.144107>.
4. Mean first passage times reconstruct the slowest relaxations in potential energy landscapes of nanoclusters / Teruaki Okushima [et al.] // *Physical Review E*. — 2019. — sep. — Vol. 100, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.100.032311>.
5. Gadomsky O. N., Gadomskaya I. V., Altunin K. K. Giant enhancement of light in atomic clusters // *JETP Letters*. — 2009. — oct. — Vol. 90, no. 4. — P. 244–250. — URL: <https://doi.org/10.1134/s002136400916005x>.
6. Giant photovoltaic effect / O. N. Gadomsky [et al.] // *JETP Letters*. — 2011. — may. — Vol. 93, no. 6. — P. 320–325. — URL: <https://doi.org/10.1134/s002136401106004x>.

7. Gadomsky O. N., Idiatullov T. T. Optical size resonances in nanostructures // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2001. — jun. — Vol. 92, no. 6. — P. 1060–1071. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.1385648>.
8. Gadomsky O. N., Kadochkin A. S. Boundary-value problems in near-field optical microscopy and optical size resonances // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2003. — sep. — Vol. 97, no. 3. — P. 466–478. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.1618333>.
9. Gadomskii O. N., Abramov Yu. V. Nonlinear steady-state sized resonances in diatomic nanostructural objects // Optics and Spectroscopy. — 2002. — dec. — Vol. 93, no. 6. — P. 879–884. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.1531711>.
10. Gadomskii O. N., Abramov Yu. V. Linear nonstationary optical dimensional resonances in atomic nanostructures // Optics and Spectroscopy. — 2002. — jul. — Vol. 93, no. 1. — P. 61–68. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.1496725>.
11. Gadomsky O. N., Glukhov A. G. Nonlinear resonances in the near-field interaction between atoms // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2006. — jul. — Vol. 103, no. 1. — P. 23–34. — URL: <https://doi.org/10.1134/s106377610607003x>.

Information about authors:

Konstantin Konstantinovich Altunin – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

Alexey Alexandrovich Lebedev — 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: alexjek73@gmail.com

ORCID iD  0000-0002-0432-6409

Web of Science ResearcherID  AFN-9300-2022