

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Нелинейное поглощение лазерного излучения частицами алюминия в матрице бромида калия

А.С.Зверев, А.В.Каленский, Г.Е.Овчинников, А.А.Звекон, Е.В.Галкина

Экспериментально исследованы оптические свойства модельного спрессованного композита бромид калия – алюминий марки ALEX. Показано, что спектральные зависимости коэффициентов полного пропускания и диффузного отражения могут быть описаны с учетом содержания в образце как отдельных наночастиц алюминия, так и их агрегатов с характерным радиусом 133 нм. Установлено, что в процессе воздействия непрерывного лазерного излучения с длиной волны 1070 нм начинается нелинейное поглощение излучения частицами алюминия, фиксируемое по изменению оптической плотности образцов. Предложена модель эффекта, основанная на нагреве образца и температурной зависимости оптических характеристик частиц алюминия. Результаты расчетов качественно соответствуют наблюдаемым изменениям оптической плотности, что обосновывает применимость к данной модельной системе термического механизма нелинейного поглощения электромагнитного излучения частицами металлов.

Ключевые слова: нелинейное поглощение излучения, лазерное излучение, алюминий, термический механизм.

1. Введение

Оптические свойства наночастиц металлов и состоящих из них структур достаточно давно привлекают внимание исследователей. Хорошо разработана теория поглощения и рассеяния электромагнитного излучения наночастицами металлов [1, 2], которая позволяет оптимизировать линейные оптические свойства систем на их основе [3]. Эффект нелинейного поглощения излучения металлическими наночастицами [4–6] может быть использован для создания переключающих устройств, способных к селекции излучения по интенсивности. Нелинейные оптические характеристики образцов на основе наночастиц в прозрачной матрице зависят от природы металла и матрицы, размера и формы наночастиц, а также от длины волны и длительности импульса излучения [4, 5]. Для интерпретации эффекта нелинейного поглощения света наночастицами металлов была предложена группа термических механизмов, основанных на нагреве наночастиц излучением с соответствующим изменением их оптических характеристик [7–9].

При исследовании оптических свойств металлических наночастиц большинство работ было выполнено с использованием наночастиц серебра и золота, поскольку полосы их плазмонного поглощения попадают в видимую область [4–6] и существуют хорошо апробированные методики синтеза наночастиц нужного размера [4]. У наночастиц алюминия области плазмонного поглощения приходятся на УФ область спектра [10], а эпитаксиальные пленки алюминия с особой структурой могут проявлять плазмонные свойства и в видимой области [11]. При использовании импульсного излучения первой и второй гармоник неодимового лазера был обнаружен выраженный эффект

нелинейного поглощения системы пентаэритрит тетрагидрат – наночастицы алюминия, зафиксированный оптоакустическим методом [12]. В работе [13] были получены пленки поливинилового спирта с добавками наноразмерных частиц алюминия и показано, что добавка алюминия приводит к увеличению коэффициента нелинейного поглощения стационарного излучения с длиной волны 532 нм. Нелинейное поглощение наночастиц алюминия, полученных методом абляции в четыреххлористом углероде и хлороформе, было обнаружено в [14].

Частицы алюминия являются удобным модельным объектом для исследования термических механизмов нелинейного поглощения, поскольку для алюминия известны зависимости показателя преломления от температуры и длины волны [15, 16], наночастицы алюминия защищены оксидной оболочкой, которая делает их стабильными вплоть до температур плавления [17] и имеются доступные коммерческие образцы ультрадисперсного алюминия. Цели настоящей работы – экспериментально исследовать оптические характеристики спрессованных таблеток бромид калия – наночастицы алюминия, нагреваемых стационарным лазерным излучением, и интерпретировать экспериментальные данные в рамках термического механизма нелинейного поглощения электромагнитного излучения, основанного на температурной зависимости показателя преломления металла. Бромид калия выбран в качестве прозрачной в видимой и ИК областях матрицы как хорошо прессуемый материал с кубической решеткой, для которого известны температурная и спектральная зависимости показателя преломления [18].

2. Методика эксперимента

Для фотометрических исследований были подготовлены спрессованные таблетки бромида калия марки ОСЧ, содержащие 0.05% и 0.025% (по массе) порошка алюминия марки ALEX. Порошок содержит агрегаты наночастиц с радиусами от 25 до 100 нм (средний радиус частиц 60 нм), размер отдельных агрегатов может достигать 1 мкм [19]. На рис. 1, б, в приведены изображение порошка, полу-

А.С.Зверев, А.В.Каленский, Г.Е.Овчинников, А.А.Звекон, Е.В.Галкина. Кемеровский государственный университет, Россия, 650000 Кемерово, ул. Красная, 6; e-mail: kalenskyav@gmail.com

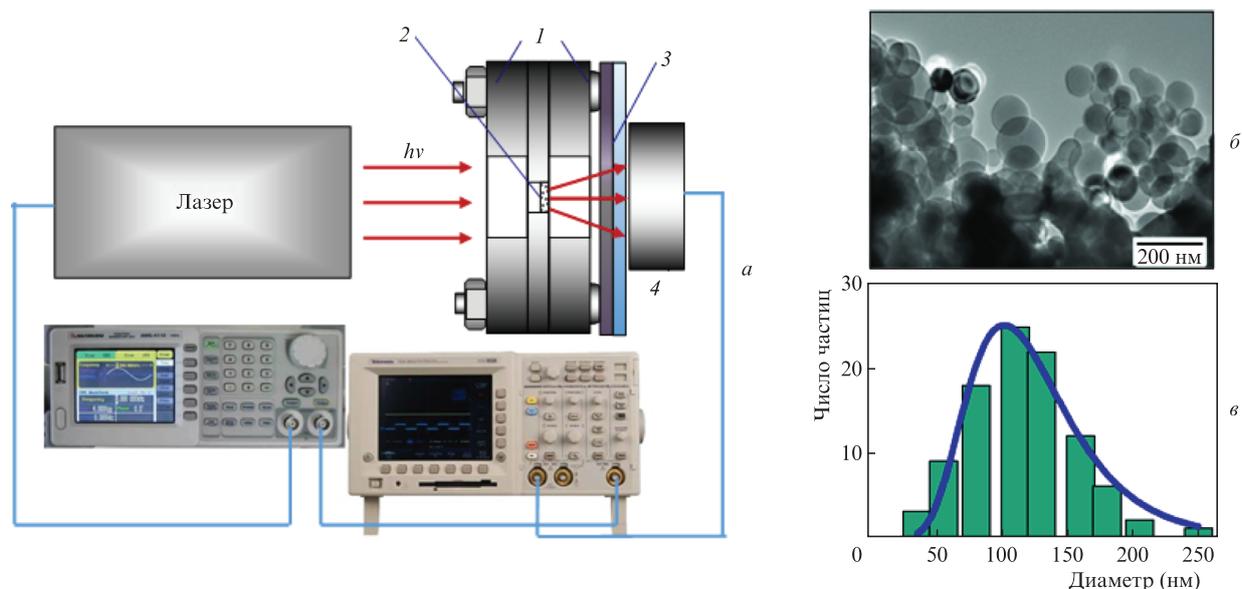


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки (а), изображение порошка, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии (б), и гистограмма распределения частиц по размерам без учета агрегирования (в): 1 – шайба для позиционирования образца в держателе; 2 – образец; 3 – светофильтры; 4 – фотодиод.

ченное методом просвечивающей электронной микроскопии, и гистограмма распределения частиц по размерам без учета агрегирования. Для приготовления образцов предварительно измельченный бромид калия просушивался в течение 3 ч при температуре 250 °С в муфельной печи. После чего он остужался в печи и в эксикаторе до комнатной температуры. Подготовленный порошок KBr смешивался с порошком алюминия интенсивным растиранием в агатовой ступке до образования смеси с массовым содержанием алюминия 1%. Затем данная смесь смешивалась в такой же ступке с необходимым количеством бромида калия для получения смесей с содержанием алюминия 0.025% и 0.1%, из которых прессованием с помощью гидравлического пресса (ООО «ЛабТулс», Россия) под давлением 1.2 ГПа в течение 30 мин изготавливались экспериментальные образцы диаметром 25 мм. Масса образца составляла 400 ± 1 мг, его толщина $L = 300 \pm 10$ мкм.

Вначале были измерены линейные оптические характеристики таблеток чистого бромида калия и таблеток с добавками алюминия по методике работы [20]. Регистрация спектров полного пропускания (диффузная и коллимированная составляющие) и диффузного отражения в диапазоне длин волн 190–1500 нм осуществлялась с помощью сканирующего спектрофотометра Shimadzu UV-3600 (Shimadzu Corp., Япония), оснащенного светоинтегрирующей сферой ISR-3100.

Для исследования нелинейных оптических характеристик частиц алюминия при воздействии на них лазерного излучения были подготовлены спрессованные образцы диаметром 3 мм (масса 6 мг, толщина 300 ± 10 мкм). Образцы подготавливались в стальном держателе так же, как в работе [21]. Принципиальная схема эксперимента приведена на рис.1,а. Излучение волоконного иттербиевого лазера YLS-150/1500-QCW с коллиматором IPG P30-001460 (длина волны 1070 нм) проходило через таблетку и регистрировалось фотодиодом и цифровым осциллографом Tektronix TDS3032B (Tektronix, Inc., США). Расположение детектора вплотную к сборке с образцом позволяло определять суммарную интенсивность прошедшего излучения, включающую в себя также интенсивность его диффузной

составляющей. Длительность лазерного воздействия во всех измерениях составляла 2 с. Импульсом лазера и запуском осциллографа управлял цифровой генератор импульсов Актаком AWG-4110 (Актаком, Россия).

Изменение оптической плотности образцов (δA) во времени определялось вычитанием из сигнала его начального значения, соответствующего оптическим характеристикам образцов при комнатной температуре.

3. Результаты эксперимента

Спектральные зависимости коэффициентов полного пропускания τ_t и диффузного отражения ρ_d бромида калия без добавок алюминия приведены на рис.2,а (кривые 1 и 2). В области спектра 500–1500 нм зависимости близки к линейным, изменения τ_t и ρ_d связаны с зависимостью показателя рассеяния излучения на порах от длины волны. Ультрафиолетовая область спектра при $\lambda < 400$ нм обусловлена поглощением бромида калия.

Измеренные спектры коэффициентов полного пропускания и отражения образцов KBr–Al с массовой долей алюминия 0.025% (рис.2,б, кривые 1 и 2) имеют локальные экстремумы в области 800 нм, соответствующие межзонному поглощению алюминия [15, 16]. Частицы алюминия эффективно поглощают и рассеивают излучение во всей исследованной спектральной области, что приводит к уменьшению коэффициента пропускания и к росту коэффициента диффузного отражения по сравнению с аналогичными параметрами для чистой матрицы.

Зависимости изменения оптической плотности от экспозиции лазерного излучения приведены на рис.3. Измерения проводились при четырех значениях мощности лазерного излучения: 1.24 Вт (17.5 Вт/см^2), 1.51 Вт (21.46 Вт/см^2), 1.79 Вт (25.38 Вт/см^2) и 3.02 Вт (42.65 Вт/см^2). Все зависимости, кроме соответствующей самой низкой интенсивности лазерного излучения, имеют вид кривой с максимумом. При этом значения максимального увеличения оптической плотности практически совпадают для трех наибольших мощностей лазерного излучения. Также наблюдается совпадение кривых на их начальных участ-

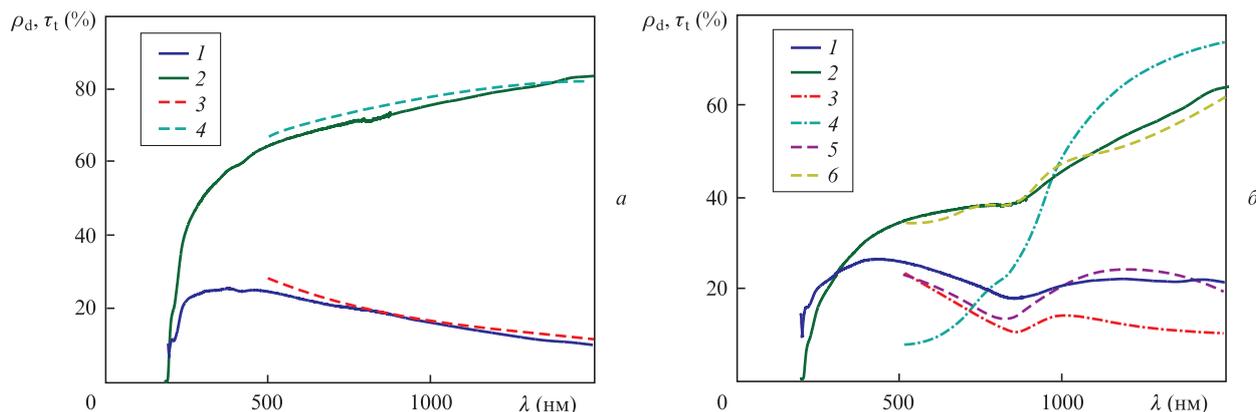


Рис.2. Спектры диффузного отражения ρ_d (1, 3, 5) и полного пропускания τ_t (2, 4, 6) спрессованных таблеток чистого бромиды калия (а) и таблеток с добавкой 0.025% (по массе) частиц алюминия ALEX (б). Кривые 1, 2 – эксперимент, 3–6 – расчет.

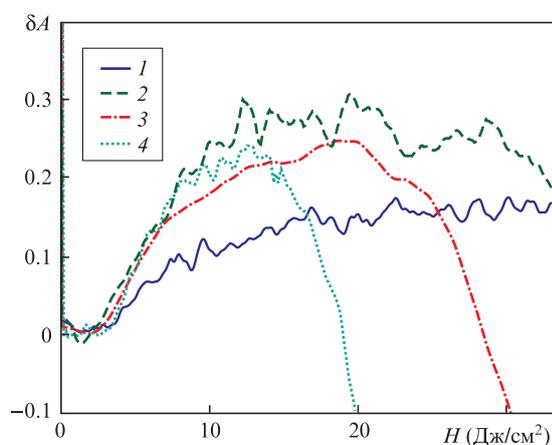


Рис.3. Зависимости изменения оптической плотности образцов от экспозиции лазерного излучения при его мощности 1.24 (1), 1.51 (2), 1.79 (3) и 3.02 Вт (4).

ках, из чего можно сделать вывод о низкой интенсивности теплоотода от образца. Зависимость, зарегистрированная для самой низкой мощности 1.24 Вт, в процессе облучения выходит на стационарные значения, заметно меньшие максимального изменения оптической плотности, наблюдаемого при большей мощности лазерного излучения. При мощностях свыше 1.24 Вт оптическая плотность образца уменьшалась до значений, значительно меньших исходных. В этом случае с образцом происходили заметные невооруженным глазом изменения: он становился более прозрачным, а при использовании оптического микроскопа можно было выделить области плавления не только алюминия, но и бромиды калия.

4. Моделирование спектральных зависимостей

Моделирование спектральных зависимостей коэффициентов полного пропускания τ_t и диффузного отражения ρ_d осуществлялось по методике работы [20]. Для расчета оптических свойств частиц алюминия (коэффициенты эффективности поглощения Q_{abs} и эффективности рассеяния Q_{sca} , индикатриса рассеяния χ) в рамках теории Ми использовались значения комплексных показателей преломления металла [16] и бромиды калия [18]. Предварительно было выполнено моделирование зависимостей $\tau_t(\lambda)$ и $\rho_d(\lambda)$ для спрессованных таблеток бромиды калия без

добавки алюминия. В этом случае ослабление излучения связано только с его диффузным рассеянием на порах. Спектральная зависимость показателя рассеяния матрицы бромиды калия аппроксимировалась выражением

$$\mu_{\text{KBr}} = \mu_{\text{KBr}}^{(0)} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^b,$$

где варьируемыми параметрами являются $\mu_{\text{KBr}}^{(0)}$ – значение показателя рассеяния при длине волны λ_0 , в качестве которой была выбрана длина волны 500 нм, и степень b . Индикатриса рассеяния задавалась в рэлеевском виде. Для расчета коэффициентов $\tau_t(\lambda)$ и $\rho_d(\lambda)$ применялось одномерное уравнение переноса монохроматического излучения [22, 23], которое решалось при френелевских граничных условиях методом сферических гармоник [20]. В расчетах использовалось 20 гармоник. Схема расчета описана в [20, 23]. Критерием согласия рассчитанных и экспериментальных значений служил минимум суммы квадратов отклонений. Для минимизации суммы применялся метод Нейлдера–Мида. Численные значения для сравнения выбирались в спектральной области 500–1500 нм с шагом 50 нм. Наилучшее согласие было получено для параметров $\mu_{\text{KBr}}^{(0)} = 28.7 \text{ см}^{-1}$ и $b = 1.093$ (рис.2,а, кривые 3, 4).

На рис.2,б показаны рассчитанные зависимости $\tau_t(\lambda)$ и $\rho_d(\lambda)$ для спрессованной таблетки KBr–Al (0.025%) в предположении, что средний радиус частиц составляет 60 нм, а показатель рассеяния μ_{KBr} равен его значению для чистого бромиды калия (кривые 3, 4). Хорошо видно сильное различие расчетных и экспериментальных зависимостей. Учет распределения частиц по размерам не приводит к согласию результатов расчета и эксперимента. Увеличение размера частиц вызывает уменьшение наклона зависимостей $\tau_t(\lambda)$ и $\rho_d(\lambda)$. Увеличение эффективного размера частиц возможно при их агрегации. При прессовании таблетки часть пор заполняется частицами алюминия [23], что приводит к уменьшению показателя рассеяния матрицы. В следующем цикле расчетов в качестве варьируемых параметров использовались характерный радиус агломерата частиц алюминия, массовая доля агрегатов и отношение показателя рассеяния бромиды калия в таблетке с алюминием к его значению в чистом KBr (относительный показатель рассеяния). Результаты расчетов при оптимальных параметрах (средний радиус агрегатов алюминия 133 нм, массовая доля агрегированных частиц 86% и относительный показатель рассеяния матри-

цы 0.157) приведены на рис.2,б (кривые 5 и 6). Таким образом, гипотеза о сохранении высокой степени агрегирования алюминия позволяет объяснить характер полученных спектральных зависимостей.

5. Модель изменения оптических свойств нагреваемого излучением образца

Нагрев лазерным излучением спрессованной таблетки КВг–Al приводит к изменению коэффициента полного пропускания. Схема моделирования данного эффекта представлена на рис.4.

Сначала с использованием температурных зависимостей комплексных показателей преломления алюминия и бромида калия рассматривались зависимости от температуры оптических свойств частиц алюминия с радиусами 60 и 133 нм в рамках теории Ми (блок I), из которых определялись локальные показатели поглощения и рассеяния образца. Предполагалось, что вклад матрицы в показатель рассеяния не изменяется при увеличении температуры. Полученные зависимости применялись для расчета (в рамках теории переноса излучения в плоскопараллельном слое вещества в приближении бесконечно широкого пучка) температурных зависимостей коэффициентов диффузного отражения и коэффициентов пропускания и поглощения, включающих в себя коллимированную и диффузную компоненты (блок II). Далее выполнялся расчет нагрева таблетки бромида калия. При массовой доле частиц алюминия 0.1% и характерном радиусе 133 нм концентрация частиц может быть оценена как 10^{10} см^{-3} , а характерное расстояние h между ними – как $\sim 1 \text{ мкм}$. Прогрев бромида калия, находящегося между частицами, происходит за время $\lambda_{\text{КВг}} / (c_{\text{КВг}} \rho_{\text{КВг}} h^2) \approx 0.3 \text{ мкс}$, где $\lambda_{\text{КВг}} = 0.0418 [1 - 10^{-3}(T - 273)] \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ [24] – удельная теплопроводность бромида калия, T – температура в кельвинах, $c_{\text{КВг}}$ – удельная теплоемкость, рассчитываемая на основе интерполяционной формулы Шомата согласно [25], $\rho_{\text{КВг}} = 2.75 \text{ г/см}^3$ – плотность. Время установления термического равновесия по толщине таблетки можно оценить как $c_{\text{КВг}} \rho_{\text{КВг}} L^2 / \lambda_{\text{КВг}} \approx 28 \text{ мс}$, а по радиусу – как 700 мс. По этой причине уравнение теплопроводности решалось в одномерном приближении (блок IV):

$$c_{\text{КВг}} \rho_{\text{КВг}} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{\text{КВг}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \alpha(T(r, t)) \frac{W}{L},$$

где W – плотность мощности лазерного излучения на образце; $\alpha(T(r, t))$ – коэффициент поглощения; r – радиальная координата. Образец разбивался на 50 ячеек постоянной ширины. Значения $\alpha(T(r, t))$ в каждой ячейке интерполировались из рассчитанной в блоке II зависимости

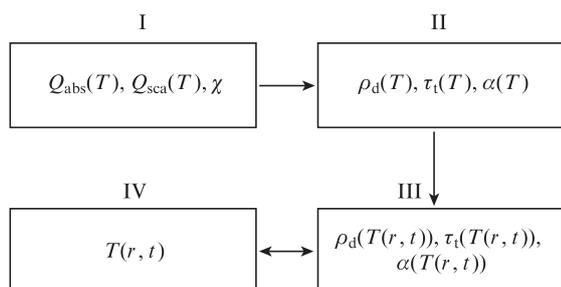


Рис.4. Схема моделирования изменения оптической плотности образца в поле лазерного излучения.

$\alpha(T)$ на каждом шаге интегрирования (блок III). Массивная стальная шайба моделировалась в виде одной ячейки шириной 1 мм, находящейся в идеальном тепловом контакте со сталью держателя образца при начальной температуре. Выбранная ширина обеспечивает близкие значения времени выравнивания температуры в стальной шайбе и в соседних ячейках бромида калия, несмотря на различие в коэффициентах теплопроводности. Расчет прекращали при достижении максимальной температурой точки плавления бромида калия.

6. Результаты моделирования нелинейного поглощения

Зависимость от температуры коэффициента эффективности поглощения излучения Q_{abs} частицами алюминия радиусом 133 нм имеет немонотонный характер (рис.5). Длина волны 1070 нм приходится на область между двумя полосами межзонного поглощения массивного алюминия, вклад свободных электронов в оптическую проводимость в этом случае составляет, по оценкам работы [15], порядка 30%. В области $T = 590 \text{ К}$ происходят замедление увеличения мнимой части и одновременное ускорение уменьшения действительной части диэлектрической проницаемости алюминия с ростом температуры, что приводит к появлению максимума коэффициента эффективности поглощения (0.231). Вблизи точки плавления коэффициент эффективности поглощения даже немного ниже, чем при $T = 300 \text{ К}$ (0.149 и 0.170). Плавление вызывает резкое увеличение Q_{abs} , после чего температурная зависимость становится близкой к линейной. Коэффициент эффективности рассеяния уменьшается во всем интервале температур. На участке от $T = 300 \text{ К}$ до температуры плавления уменьшение составляет 4.5%, при плавлении – 9.9%. Аналогичные зависимости были получены ранее для частиц алюминия радиусом 60 нм [16].

Рассчитанная зависимость коэффициента поглощения таблетки КВг (толщина 300 мкм, массовая доля алюминия 0.1%) от температуры (рис.6) качественно близка к зависимости $Q_{\text{abs}}(T)$, однако изменение $\alpha(T)$ не столь значительно: от 0.570 при $T = 300 \text{ К}$ до 0.623 при $T = 590 \text{ К}$. Аналогичным образом коэффициент полного пропускания уменьшается от 29.7% до 25.7% в том же диапазоне температур с последующим возрастанием до 31.7% при температуре плавления. Изменение температуры оказы-

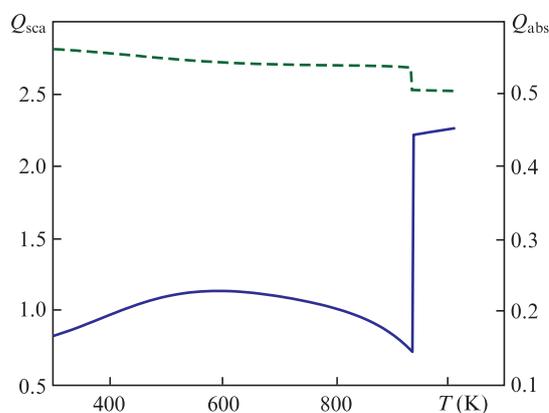


Рис.5. Рассчитанные температурные зависимости коэффициентов эффективности поглощения Q_{abs} (сплошная кривая) и эффективности рассеяния Q_{sca} (штриховая кривая) излучения с длиной волны 1070 нм частицами алюминия радиусом 133 нм.

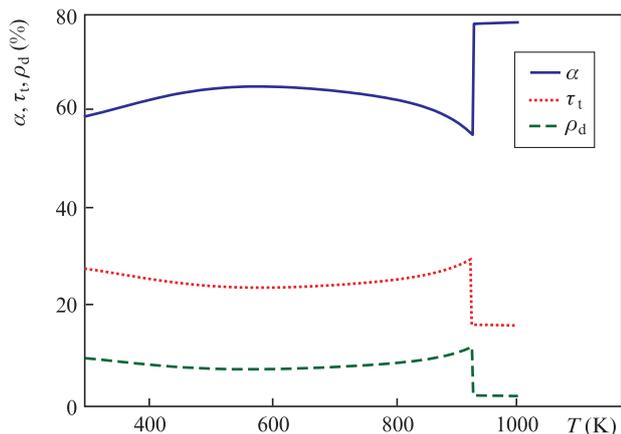


Рис.6. Рассчитанные температурные зависимости коэффициентов поглощения, пропускания и отражения образца KBr–Al толщиной 300 мкм при массовой доле алюминия 0.1%.

вает противоположное влияние на коэффициент диффузного отражения и коэффициент поглощения $\alpha(T)$, поскольку для оптически плотных образцов ρ_d определяется, в основном, величиной альбедо однократного рассеяния.

На рис.7,*а* приведены рассчитанные радиальные распределения температуры в образце KBr–Al в процессе его нагрева лазерным излучением с длиной волны 1070 нм и мощностью 1.79 Вт. Плохой тепловой контакт приводит к большим значениям температуры, в то же время сток тепла на границах проявляется в том, что максимум температуры возникает в центре образца, а рост температуры со временем замедляется. Соответствующие распределения изменения оптической плотности образца показаны на рис.7,*б*. По мере нагрева рост температуры при-

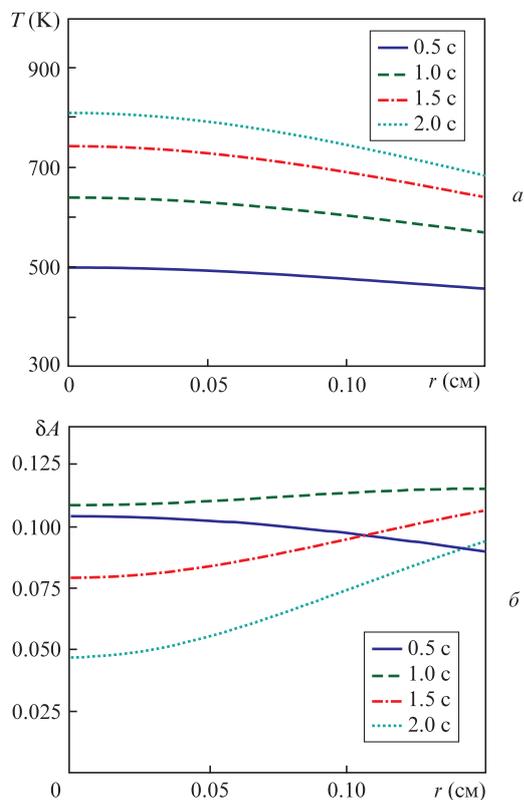


Рис.7. Рассчитанные радиальные распределения температуры (*а*) и изменения оптической плотности (*б*) в образце KBr–Al (0.1% по массе) при различных временах расчета.

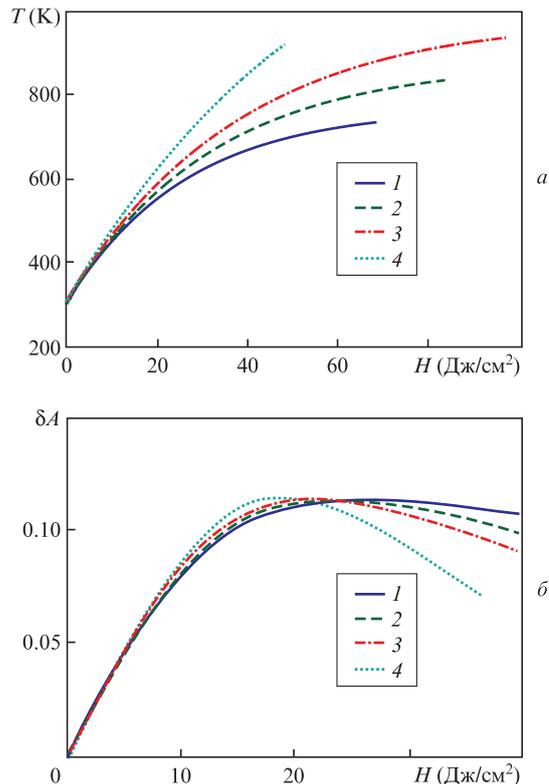


Рис.8. Рассчитанные зависимости температуры в центре таблетки (*а*) и интегрального изменения оптической плотности (*б*) от плотности энергии излучения H при мощности лазера 1.24 (1), 1.51 (2), 1.79 (3) и 3.02 Вт (4).

водит сначала к увеличению, а потом к уменьшению оптической плотности. Поэтому с течением времени максимум δA смещается от центра к краю образца. Рассчитанные зависимости температуры в центре образца и интегрального изменения оптической плотности от плотности энергии импульса приведены на рис.8. Во всех случаях температура в центре образца монотонно растет, а зависимости для интегральной величины δA имеют максимум, сдвигающийся в область большей плотности энергии при росте мощности лазерного излучения. Напомним, что в эксперименте (рис.3) происходит аналогичный сдвиг максимума. Рассчитанные зависимости демонстрируют меньшие максимальные значения δA , кроме зависимости для мощности 1.24 Вт. Наихудшее согласие результатов расчета и эксперимента наблюдается для наибольшей мощности 3.02 Вт. Вероятные причины этого обусловлены вызванной термическим расширением деформацией таблетки, которая способна привести к появлению трещин.

Несмотря на указанные расхождения результатов эксперимента и моделирования, можно утверждать, что изменение оптической плотности образца связано, в основном, с изменением оптических свойств наночастиц при их нагреве. Следует отметить, что при моделировании использовались справочные и литературные данные, а эффективный радиус агрегатов был оценен по результатам спектральных измерений.

7. Заключение

Экспериментально показано, что в процессе воздействия непрерывного лазерного излучения с длиной волны

1070 нм начинается нелинейное поглощение излучения частицами алюминия, связанное с нагревом образца. Обнаруженный эффект интерпретируется в рамках термического механизма нелинейного поглощения, основанного на температурной зависимости оптических постоянных металла.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МД-3502.2021.1.2.

1. Mie G. *Ann. Phys.*, **330**, 377 (1908).
2. Шифрин С. *Рассеяние света в мутной среде* (М.–Л.: ГИТТЛ, 1951).
3. Климов В.В. *Наноплазмоника* (М.: Физматлит, 2010).
4. Zhang Y., Wang Y. *RSC Advances*, **7**, 45129 (2017).
5. Ганеев Р.А. *Оптика и спектроскопия*, **127**, 453 (2019) [*Opt. Spectrosc.*, **127**, 487 (2019)].
6. Zarate-Reyes J.M., Sanchez-Dena O., Flores-Romero E., Peralta-Angeles J.A., Reyes-Esqueda J.A., Cheang-Wong J.C. *Opt. Mater.*, **111**, 110616 (2021).
7. Sivan Y., Chu S.-W. *Nanophotonics*, **6**, 317 (2017).
8. Un I.W., Sivan Y. *Phys. Rev. Mater.*, **4**, 105201 (2020).
9. Каленский А.В., Звекоев А.А., Никитин А.П. *ЖПС*, **83**, 972 (2016) [*J. Appl. Spectrosc.*, **83**, 1020 (2017)].
10. Knight M.W., King N.S., Liu L., Everitt H.O., Nordlander P., Halas N.J. *ACS Nano*, **8**, 834 (2014).
11. Cheng C.-W., Raja S.S., Chang Ch.-W., Zhang X.-Q., Liu P.-Y., Lee Y.-H., Shih Ch.-K., Gwo Sh. *Nanophotonics*, **10**, 627 (2021).
12. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Белокуров Г.М., Нелюбина Н.В., Тупицын А.В. *Оптика и спектроскопия*, **124**, 404 (2018) [*Opt. Spectrosc.*, **124**, 412 (2018)].
13. Naseri F., Dorrastian D. *Opt. Quantum Electron.*, **49**, 4 (2017).
14. Krishna Podagatlapalli G., Hamad S., Sreedhar S., Tewari S.P., Venugopal Rao S. *Chem. Phys. Lett.*, **530**, 93 (2012).
15. Mathewson A.G., Myers H.P. *J. Phys. F: Met. Phys.*, **2**, 403 (1972).
16. Каленский А.В., Звекоев А.А., Адуев Б.П. *Оптика и спектроскопия*, **124**, 484 (2018) [*Opt. Spectrosc.*, **124**, 501 (2018)].
17. Vorozhtsov A.B., Lerner M., Rodkevich N., Nie H., Abraham A., Schoenitz M., Dreizin E.L. *Thermochim. Acta*, **636**, 48 (2016).
18. Li H.H. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **5**, 329 (1976).
19. Yang Y., Sun Zh., Wang Sh., Dlott D.D. *J. Phys. Chem. B*, **107**, 4485 (2003).
20. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Белокуров Г.М., Звекоев А.А., Каленский А.В., Никитин А.П., Лисков И.Ю. *ЖТФ*, **84**, 126 (2014) [*Tech. Phys.*, **59**, 1387 (2014)].
21. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Звекоев А.А., Лисков И.Ю., Белокуров Г.М., Нелюбина Н.В. *ЖТФ*, **89**, 174 (2019) [*Tech. Phys.*, **64**, 143 (2019)].
22. Исимару А. *Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1* (М.: Мир, 1981).
23. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Звекоев А.А., Нелюбина Н.В., Созинов С.А., Каленский А.В., Ананьева М.В., Галкина Е.В. *Оптика и спектроскопия*, **128**, 659 (2020) [*Opt. Spectrosc.*, **128**, 664 (2020)].
24. *Таблицы физических величин. Справочник*. Под ред. И.К.Кикоина (М.: Атомиздат, 1975).
25. Chase M.W. Jr; <https://srdata.nist.gov/JPCRD/jpcrdM9.pdf>.