

**О. В. Буганов¹, А. Д. Замковец¹, А. Н. Понявина¹, С. А. Тихомиров¹,
Фам Хон Мынь², Нгуен Тан Бынь², Нгуен Дай Хунг²**

¹Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Институт физики Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам

СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПЛАЗМОННЫХ НАНОСТРУКТУР

Изучены особенности наведенных изменений в спектрах оптической плотности многослойных наноструктур Ag-Na₃AlF₆ при их возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами в полосе плазмонного поверхностного резонанса поглощения (ППРП). Зарегистрирована зависимость амплитуды наведенных изменений в области ППРП от толщины диэлектрических пленок Na₃AlF₆, разделяющих монослои наночастиц серебра. Обнаружено существенное увеличение амплитуды оптического отклика (до 80 %) для наноструктуры с четвертьволновыми прослойками Na₃AlF₆. Характеристические времена релаксации наводимых изменений при энергиях возбуждения 5–10 мкДж для наноструктур с различной толщиной диэлектрических прослоек Na₃AlF₆ практически не изменяются, составляют ~2 пс и совпадают с временными параметрами кинетического отклика, характерными для используемого монослоя наночастиц Ag.

Ключевые слова: ультракороткие лазерные импульсы, динамика электронных возбуждений, плотноупакованные наноструктуры, поверхностный плазмонный резонанс

**O. V. Buganov¹, A. D. Zamkovets¹, A. N. Ponyavina¹, S. A. Tikhomirov¹,
Pham Hong Minh², Nguyen Thanh Binh², Nguyen Dai Hung²**

¹B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

SPECTRAL-TEMPORAL DYNAMICS OF TRANSIENT ABSORPTION OF MULTILAYER PERIODIC PLASMONIC NANOSTRUCTURES

The features of the induced changes in the optical density spectra of multilayer Ag-Na₃AlF₆ nanostructures under a femtosecond laser pulses excitation in the band of surface plasmonic resonance of absorption (SPRA) were studied. The dependence of the amplitude of the induced changes on the thickness of the dielectric Na₃AlF₆ films separating the monolayers of silver nanoparticles was registered. A significant increase of the optical response amplitude (up to 80 %) was found for the nanostructures with the quarter-wavelength Na₃AlF₆ interlayers. For nanostructures with different-thickness dielectric Na₃AlF₆ interlayers the characteristic relaxation times of induced changes at an excitation energy of 5–10 μJ do not practically vary, are equal to ~2 ps and coincide with the kinetic response time parameters of the used silver nanoparticle monolayers.

Keywords: ultrashort laser pulses, dynamics of electronic excitations, densely packed nanostructures, surface plasmonic absorption resonance.

Введение. В настоящее время интенсивно исследуются различного вида наноструктуры, в состав которых входят наночастицы благородных металлов. Такие системы характеризуются наличием полос поверхностного плазмонного резонансного поглощения (ППРП), возникающих вследствие коллективных колебаний электронов проводимости в металлических наночастицах. Возбуждение указанных наноструктур ультракороткими световыми импульсами приводит к созданию сильно неравновесного ансамбля носителей заряда в наночастицах, что существенно влияет на спектральные свойства системы. Быстрая эволюция неравновесного ансамбля и, соответственно, спектральных характеристик наноструктуры во времени происходит по законам, зависящим как от свойств металлических наночастиц, так и от диэлектрического окружения. При этом существенное влияние на процессы релаксации энергии электронных возбуждений могут оказывать морфологические характеристики наноструктурированных образцов.

Установление механизмов быстропротекающих процессов и оценка возможностей варьирования амплитудных и скоростных параметров оптического отклика образцов на возбуждение фемтосекундными световыми импульсами за счет материала и топологии наноструктуры необ-

ходимы для решения практических задач, связанных с созданием быстродействующих полностью оптических модулирующих устройств и переключателей, а также с поиском новых методов диагностики композитных материалов.

До недавнего времени динамика релаксации электронных возбуждений в плазмонных наноструктурах изучалась в основном для разреженных коллоидов и нанокompозитов, характеризующихся небольшой объемной концентрацией плазмонных частиц. В этом случае она определяется, главным образом, свойствами отдельных наночастиц и может зависеть как от материала частиц, так и от их размера и формы [1–5]. Дополнительные возможности управления оптическими характеристиками плазмонных наноструктур возникают при плотной упаковке и частичном пространственном упорядочении металлических наночастиц [6, 7], когда значимыми становятся эффекты коллективной природы. При определенных условиях в процессе изготовления наноструктур могут возникать кластеры из нанокристаллитов, в случае увеличения их концентрации может образоваться фрактальная структура, а при достаточно плотной упаковке возникает ближний порядок в расположении частиц.

В работе [8] установлено немонотонное изменение времени релаксации наведенных изменений в полосе ППП при возрастании поверхностной плотности металла (ППМ) для плотноупакованных монослоев наночастиц Ag (островковых пленок) в тонкопленочных матрицах Na_3AlF_6 . Обнаруженная тенденция времен релаксации объяснена изменением относительного вклада внутренних размерных эффектов и процессов туннелирования электронов в регистрируемые эффекты в образцах с разной ППП. Выявленные особенности интерпретированы с привлечением модели формирования коллективных электронных состояний в плотноупакованных нанокompозитах [9]. Для многослойных плазмонных наноструктур с субволновой периодичностью можно ожидать наличия дополнительных механизмов управления временными и амплитудными характеристиками оптического отклика на возбуждение ультракороткими лазерными импульсами, связанных с одновременной реализацией электронного и фотонного ограничения [10, 11].

В настоящей работе исследуется спектрально-временная динамика нестационарного поглощения многослойных наноструктур $\text{Ag-Na}_3\text{AlF}_6$, содержащих монослои плазмонных наночастиц Ag, которые контактируют с субволновыми разделительными диэлектрическими пленками Na_3AlF_6 .

Методика эксперимента. Планарные плазмонные наноструктуры $\text{Ag-Na}_3\text{AlF}_6$ изготавливались на вакуумной установке ВУ-1А последовательным термическим осаждением используемых

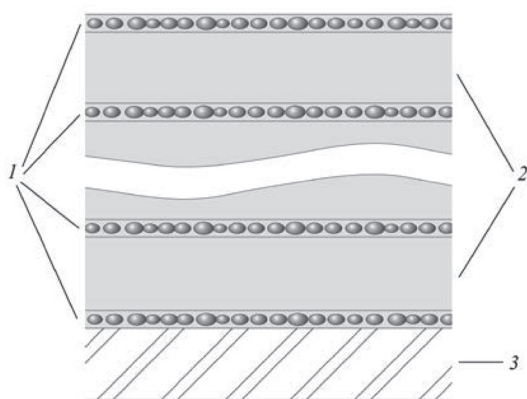


Рис. 1. Схематическое изображение многослойной периодической наноструктуры, состоящей из нескольких одинаковых монослоев плазмонных наночастиц (1), разделенных тонкими диэлектрическими пленками заданной толщины (2), и расположенной на диэлектрической подложке (3)

Fig. 1. Schematic of the multilayered periodic nanostructure composed of several identical monolayers of plasmonic nanoparticles (1) separated by thin dielectric films of defined thickness (2) and located on the dielectric substrate (3)

материалов на стеклянные или кварцевые подложки. Схематическое изображение многослойной периодической наноструктуры приведено на рис. 1. Контроль толщин осаждаемых слоев производился кварцевым датчиком. Давление остаточных газов составляло $(2-5) \cdot 10^{-3}$ Па. Температуры подложек были комнатными. Оптические спектры записывались на спектрофотометре Cary 500.

Измерения спектрально-кинетических характеристик образцов проводились с использованием фемтосекундного спектрометра [12], в основе которого лежит оригинальный генератор фемтосекундных импульсов – лазер на сапфире с титаном с импульсной синхронной накачкой. В качестве источника накачки фемтосекундного генератора использован импульсный лазер на Nd:YAG с гибридной синхронизацией мод на основе инерционной отрицательной обратной связи и нелинейного насыщающегося фильтра.

Возбуждение образцов производилось в полосе ППП наноструктуры на длине волны 395 нм второй гармоникой титан-сапфирового лазера. Длительность

возбуждающих импульсов составляла ~ 140 фс, энергия $\sim 5\text{--}10$ мкДж. В качестве зондирующих импульсов использовалось излучение фемтосекундного суперконтинуума. Изменение оптической плотности ΔD рассчитывалось по формуле $\Delta D(\lambda, t) = \lg(T_0/T)$, где $T = I_{\text{проб}}/I_{\text{оп}}$ и $T_0 = I_{\text{проб}}^0/I_{\text{оп}}^0$ – отношения энергий пробного и опорного импульсов, прошедших через исследуемый образец при возбуждении и без него.

Обсуждение полученных результатов. Стационарные спектры оптической плотности исследованных наноструктур приведены на рис. 2. Здесь кривая 1 соответствует плотноупакованному монослою наночастиц Ag с ППМ $\sim 1,9 \cdot 10^{-6}$ г·см⁻² в тонкопленочной матрице Na₃AlF₆ с толщиной диэлектрического слоя 20 нм. С использованием АСМ-микроскопии установлено, что средний размер частиц в монослое составляет порядка 5 нм, а параметр перекрытия η , характеризующий отношение

площади монослоя, занятой частицами, к его общей площади, близок к $\sim 0,4\text{--}0,45$. Кривые 2 и 3 соответствуют многослойным наноструктурам (Ag-Na₃AlF₆)⁴Ag, содержащим пять монослоев Ag с такими же конструктивными параметрами, разделенных слоями Na₃AlF₆. Толщины разделительных пленок Na₃AlF₆ равны ~ 10 нм (кривая 2) и ~ 80 нм (кривая 3), что соответствует оптическим толщинам диэлектрических слоев $\sim \lambda_0/30$ и $\sim \lambda_0/4$, где $\lambda_0 = 440$ нм – длина волны максимума поглощения полосы ППРП плотноупакованного монослоя.

Из рис. 2 видно, что для обоих многослойников в окрестности λ_0 формируется полоса ППРП, которая для четвертьволновой системы имеет меньшую полуширину и большую интенсивность. Полуширина полосы ППРП связана со временем жизни плазмона, которое обычно хорошо коррелирует с обратной полушириной стационарных спектров. Меньшая полуширина спектра оптической плотности (пропускания) для наноструктуры с четвертьволновыми разделительными слоями Na₃AlF₆ (порядка 20 %) свидетельствует о большем времени жизни плазмона в данной наноструктуре. Более высокое значение оптической плотности в максимуме полосы ППРП четвертьволновой системы связано с выполнением в этой системе условий для деструктивной интерференции, которая в четвертьволновой многослойной металл-диэлектрической наноконструктивной системе одновременно минимизирует ее пропускание (T) и отражение (R) [10, 11]. Это приводит к увеличению поглощения (A), которое может быть определено по формуле $A = 1 - T - R$ (см. рис. 3, где представлены стационарные спектры пропускания, отражения и поглощения данных систем).

Следует отметить, что при высокой плотности упаковки наночастиц в монослое (соответствующей параметру перекрытия $\eta > 0,3$) их расположение в плоскости монослоя становится частично-коррелированным. Вследствие этого возникает ближний порядок в расположении частиц и значительно усиливается роль латеральных электродинамических взаимодействий, вызванных когерентным переоблучением частиц. В соответствии с этим полоса ППРП для монослоя серебра с приведенными выше конструктивными параметрами носит коллективный характер. Ее характеристики определяются размерами нового масштаба локализации плазмона, который может существенно превышать размеры отдельной частицы. Этот новый масштаб совпадает с областью их ближней упорядоченности и возрастает с увеличением плотности упаковки.

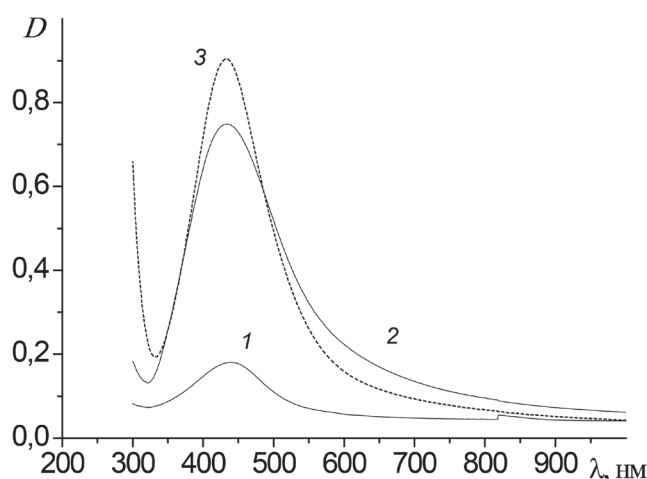


Рис. 2. Спектры оптической плотности монослоя наночастиц Ag (1) и многослойных наноструктур (Ag-Na₃AlF₆)⁴Ag (2, 3). Толщина пленок Na₃AlF₆: ~ 10 нм (2) и ~ 80 нм (3); поверхностная плотность Ag: $\sim 1,9 \cdot 10^{-6}$ г/см², $\eta \sim 0,4\text{--}0,45$

Fig. 2. Spectra of the optical density of the monolayer of silver nanoparticles (1) and multilayer nanostructures (Ag-Na₃AlF₆)⁴Ag (2, 3). The thickness of the Na₃AlF₆ films: ~ 10 nm (2) and ~ 80 nm (3); Ag MSD: $\sim 1,9 \cdot 10^{-6}$ g/cm², $\eta \sim 0,4\text{--}0,45$

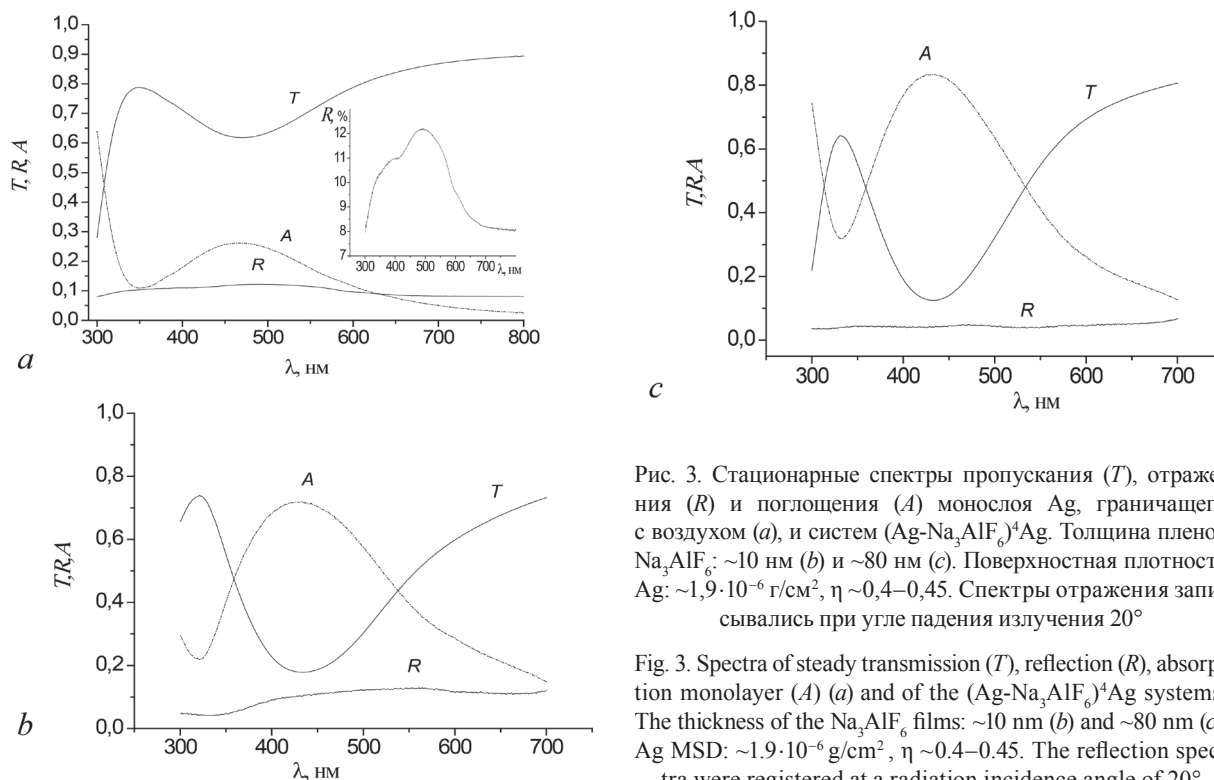


Рис. 3. Стационарные спектры пропускания (T), отражения (R) и поглощения (A) монослоя Ag , граничащего с воздухом (a), и систем $(\text{Ag}-\text{Na}_3\text{AlF}_6)^n\text{Ag}$. Толщина пленок Na_3AlF_6 : ~ 10 нм (b) и ~ 80 нм (c). Поверхностная плотность Ag : $\sim 1,9 \cdot 10^{-6}$ г/см², $\eta \sim 0,4-0,45$. Спектры отражения записывались при угле падения излучения 20°

Fig. 3. Spectra of steady transmission (T), reflection (R), absorption monolayer (A) (a) and of the $(\text{Ag}-\text{Na}_3\text{AlF}_6)^n\text{Ag}$ systems. The thickness of the Na_3AlF_6 films: ~ 10 nm (b) and ~ 80 nm (c). Ag MSD: $\sim 1,9 \cdot 10^{-6}$ g/cm², $\eta \sim 0,4-0,45$. The reflection spectra were registered at a radiation incidence angle of 20°

В спектральной области вблизи плазмонного резонанса существенно возрастает отражение плотноупакованного монослоя частиц, достигая значений порядка 10–15 % даже для частиц малого размера (см. вставку на рис. 3, a). В периодической многослойной системе возникает межслойная многолучевая интерференция волн, прошедших и отраженных от отдельных монослоев. Такая многослойная система, состоящая из ряда плотноупакованных монослоев металлических наночастиц, разделенных субволновыми диэлектрическими прослойками, представляет собой одномерный фотонно-плазмонный кристалл. В процессе фотонно-плазмонных взаимодействий дополнительно устанавливается электродинамическая связь между всеми монослоями, эффективность которой зависит от толщины диэлектрических разделительных прослоек.

Таким образом, с появлением ближнего порядка в расположении наночастиц возникает новый характерный корреляционный масштаб, а стратификация такой среды приводит к появлению выделенного направления. Все это может являться причиной качественного изменения спектров элементарных взаимодействий, чувствительных как к изменениям пространственных корреляционных масштабов, так и симметрии. Для многослойных плазмонных наноструктур с субволновой периодичностью можно ожидать наличия дополнительных механизмов управления временными и амплитудными характеристиками оптического отклика, связанных с одновременной реализацией электронного и фотонного ограничения.

Дифференциальные спектры поглощения изготовленных образцов, полученные при различных значениях времени задержки (Δt) между возбуждающими и зондирующими импульсами, приведены на рис. 4. Временная трансформация спектров определяется релаксационными процессами, связанными с возвратом разогретых мощным возбуждающим световым импульсом электронов к равновесной температуре, что осуществляется за счет взаимодействия горячих электронов с поверхностью наночастиц, с решеткой и далее за счет транспорта избыточной энергии в матрицу. Существенным является то обстоятельство, что в плотноупакованных системах эти процессы могут сопровождаться межчастичным туннелированием горячих электронов.

На рис. 4, a приведены дифференциальные спектры нестационарного поглощения плотноупакованного монослоя Ag , расположенного в тонкопленочной матрице Na_3AlF_6 . Данные спектры характеризуются наличием просветления системы в спектральной области вблизи максимума

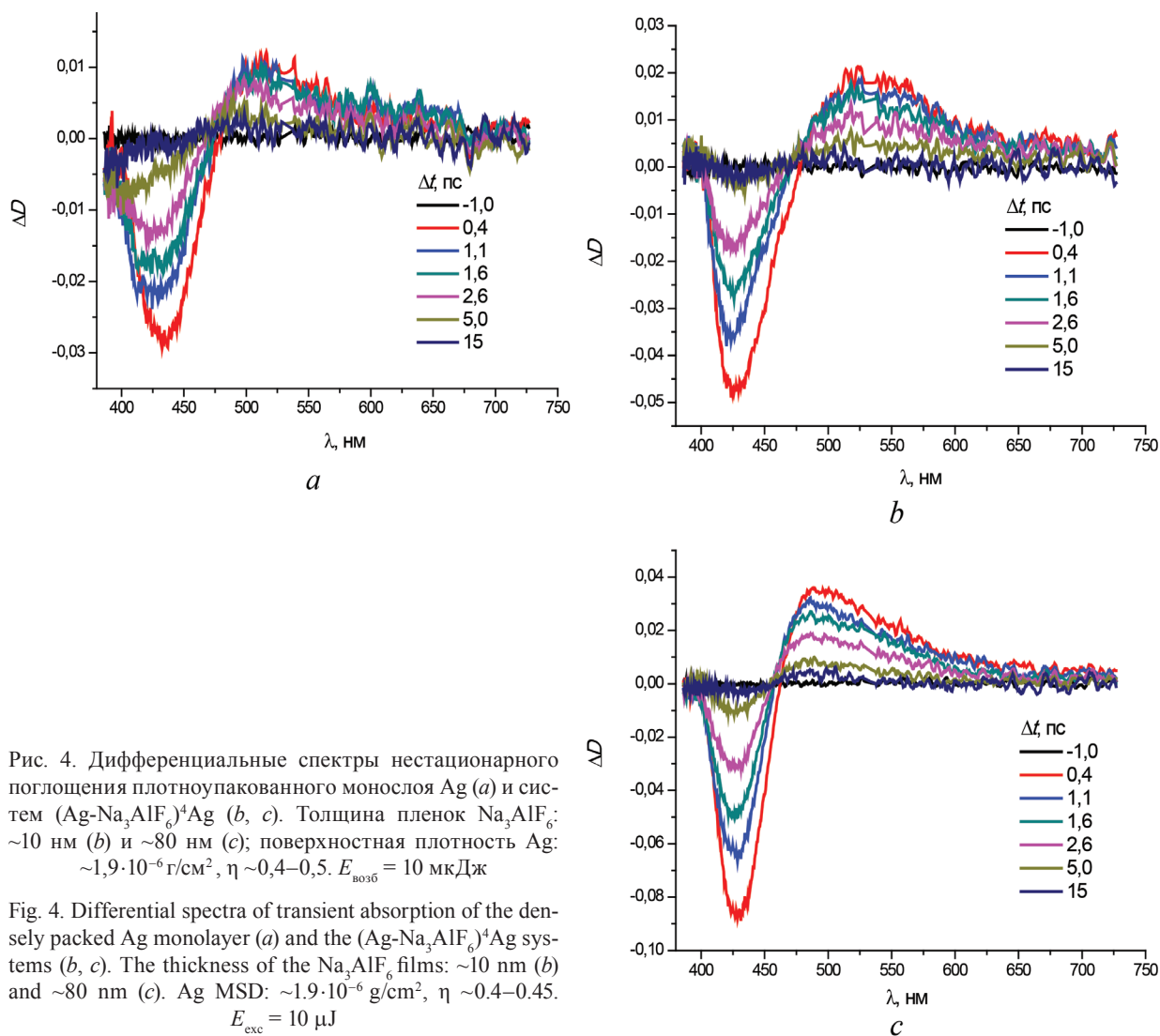


Рис. 4. Дифференциальные спектры нестационарного поглощения плотноупакованного монослоя Ag (*a*) и систем $(\text{Ag-Na}_3\text{AlF}_6)_4\text{Ag}$ (*b*, *c*). Толщина пленок Na_3AlF_6 : ~ 10 нм (*b*) и ~ 80 нм (*c*); поверхностная плотность Ag: $\sim 1,9 \cdot 10^{-6}$ г/см², $\eta \sim 0,4-0,5$. $E_{\text{возб}} = 10$ мкДж

Fig. 4. Differential spectra of transient absorption of the densely packed Ag monolayer (*a*) and the $(\text{Ag-Na}_3\text{AlF}_6)_4\text{Ag}$ systems (*b*, *c*). The thickness of the Na_3AlF_6 films: ~ 10 nm (*b*) and ~ 80 nm (*c*). Ag MSD: $\sim 1.9 \cdot 10^{-6}$ g/cm², $\eta \sim 0.4-0.45$. $E_{\text{exc}} = 10$ μJ

полосы ППРП и появлением наведенного поглощения на ее крыльях. Это свидетельствует об уширении и уменьшении интенсивности максимума полосы ППРП, что обычно связывают с двумя обстоятельствами – уменьшением времени дефазировки плазмона вследствие возрастания интенсивности рассеяния горячих электронов на поверхности наночастицы и модификацией диэлектрической функции металла при повышении электронной температуры под воздействием мощного возбуждающего лазерного импульса. Вместе с тем важно отметить, что максимальные изменения амплитуды сигнала наблюдаются на коротковолновом склоне полосы ППРП. Это означает, что помимо обычно регистрируемого при возбуждении плазмонных наночастиц фемтосекундными импульсами ослабления и уширения полосы ППРП происходит и ее смещение в длинноволновую сторону. Такое смещение поверхностного плазмонного резонансного поглощения может быть связано со специфическим для плотноупакованных систем процессом возрастания вероятности туннелирования электронов между близкорасположенными плазмонными наночастицами, возбужденными лазерным излучением, и с обусловленным этим возникновением коллективных «кластерных» электронных состояний [9]. Подобные закономерности наблюдаются и при воздействии ультракороткими лазерными импульсами с $E_{\text{возб}} = 10$ мкДж на монослои Ag с более высокими значениями ППМ в тонкослойных криолитовых матрицах [8].

Сравнение представленных на рис. 4, *b*, *c* дифференциальных спектров нестационарного поглощения многослойных систем $(\text{Ag-Na}_3\text{AlF}_6)_4\text{Ag}$ с дифференциальными спектрами монослоя показывает, что увеличенное число монослоев в многослойнике сопровождается возрастанием

амплитуды регистрируемых наведенных изменений. Это относится как к области максимального просветления, так и к области наведенного поглощения. Рассмотрим подробнее область максимального просветления исследованных наноструктур. Для системы с тонкими разделительными прослойками ($\lambda_0/30$) в этой спектральной области регистрируется неаддитивное умеренное увеличение относительно монослоя амплитуды наведенных изменений. Дополнительное существенное увеличение амплитуды оптического отклика (до 80 %) наблюдается в системах с четвертьволновыми разделительными слоями Na_3AlF_6 . Оно обусловлено эффектами, связанными с «продольным» фотонным ограничением в многослойных периодических субволновых наноструктурах и с изменением в них эффективности электродинамических фотонно-плазмонных взаимодействий при мощном лазерном возбуждении. При этом происходит не только частичная деградация коллективного плазмона, но и нарушаются резонансные условия, обеспечивавшие деструктивную многолучевую интерференцию в полосе ППП четвертьволновой системы в стационарном состоянии.

Для максимума полосы наведенного поглощения в дифференциальных спектрах также наблюдается закономерность, подобная установленной для полосы наведенного просветления. Его интенсивность последовательно увеличивается в ряду «монослой – многослойник с диэлектрическими прослойками $\lambda_0/30$ – многослойник с четвертьволновыми прослойками». Обращает на себя внимание то обстоятельство, что при переходе от монослоя к 5-слойной системе направление спектрального сдвига максимума наведенного поглощения зависит от типа системы – для многослойника с прослойками $\lambda_0/30$ этот сдвиг происходит в длинноволновую область, а для многослойника с четвертьволновыми прослойками – в коротковолновую. Величина сдвига составляет соответственно 10 и 30 нм. Коротковолновый сдвиг максимума наведенного поглощения для четвертьволновой системы сочетается с более узкой спектральной областью просветления и может также являться результатом проявления «продольного» фотонного ограничения.

На рис. 5, *a* представлена кинетика зависимости оптической плотности от времени задержки на длине волны 440 нм в полосе просветления исследованных систем. Характеристические вре-

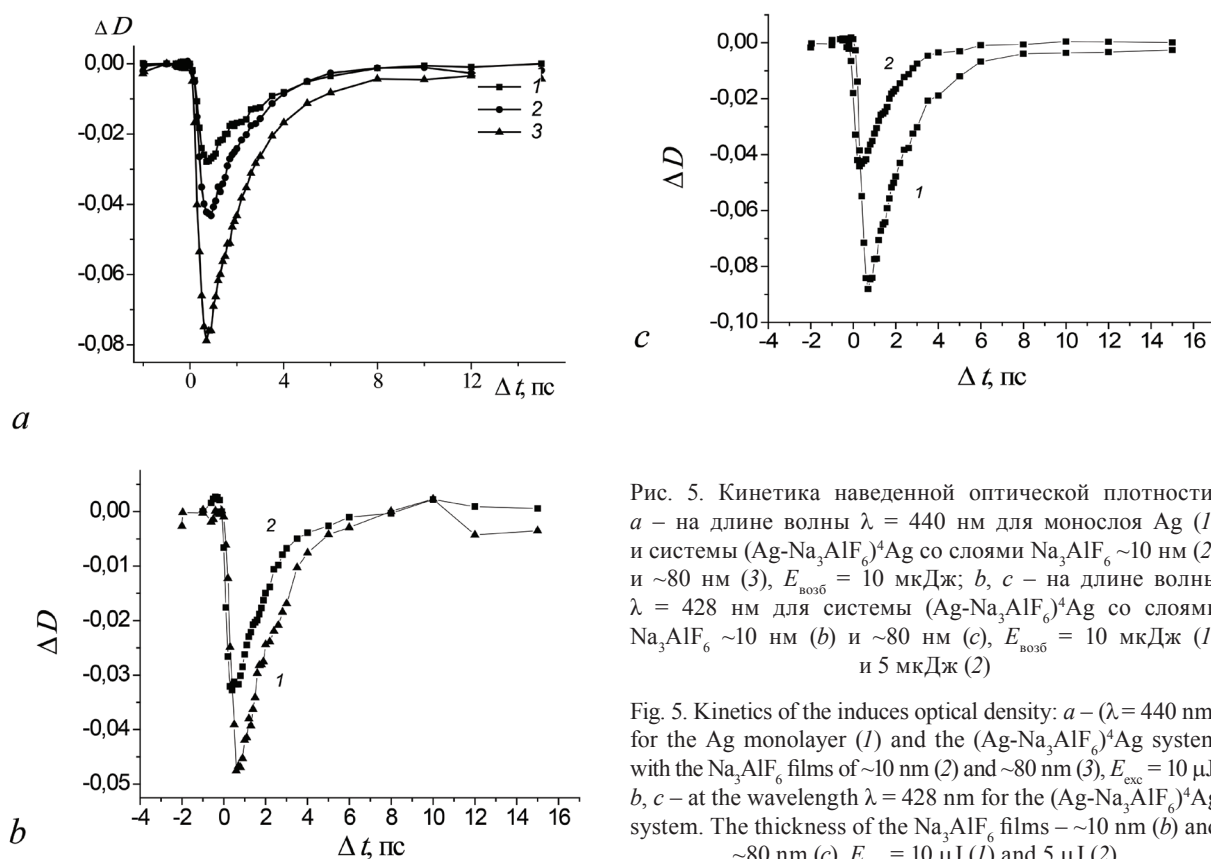


Рис. 5. Кинетика наведенной оптической плотности: *a* – на длине волны $\lambda = 440$ нм для монослоя Ag (1) и системы $(\text{Ag}-\text{Na}_3\text{AlF}_6)^4\text{Ag}$ со слоями $\text{Na}_3\text{AlF}_6 \sim 10$ нм (2) и ~ 80 нм (3), $E_{\text{возб}} = 10$ мкДж; *b*, *c* – на длине волны $\lambda = 428$ нм для системы $(\text{Ag}-\text{Na}_3\text{AlF}_6)^4\text{Ag}$ со слоями $\text{Na}_3\text{AlF}_6 \sim 10$ нм (b) и ~ 80 нм (c), $E_{\text{возб}} = 10$ мкДж (1) и 5 мкДж (2)

Fig. 5. Kinetics of the induces optical density: *a* – ($\lambda = 440$ nm) for the Ag monolayer (1) and the $(\text{Ag}-\text{Na}_3\text{AlF}_6)^4\text{Ag}$ system with the Na_3AlF_6 films of ~ 10 nm (2) and ~ 80 nm (3), $E_{\text{exc}} = 10$ μJ ; *b*, *c* – at the wavelength $\lambda = 428$ nm for the $(\text{Ag}-\text{Na}_3\text{AlF}_6)^4\text{Ag}$ system. The thickness of the Na_3AlF_6 films – ~ 10 nm (b) and ~ 80 nm (c), $E_{\text{exc}} = 10$ μJ (1) and 5 μJ (2)

мена релаксациии наводимых изменений для многослойных наноструктур $(\text{Ag-Na}_3\text{AlF}_6)^4\text{Ag}$ составляют порядка 2 пс и совпадают по величине с временными параметрами кинетического отклика, характерными для соответствующего плотноупакованного монослоя Ag. Затухание наведенных изменений в многослойных системах, как и в соответствующих монослоях, происходит моноэкспоненциально.

Использование более низких энергий возбуждения приводит к уменьшению величины оптического отклика как в области наведенного просветления, так и на длинах волн наведенного поглощения. Это видно из рис. 5, *b*, *c* где сопоставлены амплитуды максимальных наведенных изменений в полосе просветления для систем $(\text{Ag-Na}_3\text{AlF}_6)^4\text{Ag}$ при их облучении фемтосекундными лазерными импульсами с энергией 10 и 5 мкДж. При уменьшенной энергии возбуждения также получается достаточно интенсивный оптический отклик, причем его величина зависит от конструктивных параметров наноструктуры. Характеристические времена релаксации наводимых изменений при уменьшении энергии возбуждения от 10 до 5 мкДж сохраняют свои значения.

Заклучение. Таким образом, проявление эффектов фотонного ограничения в многослойных 1D периодических системах $\text{Ag-Na}_3\text{AlF}_6$ позволяет существенно влиять на спектрально-амплитудные характеристики оптического отклика такой системы на воздействие фемтосекундными лазерными импульсами путем изменения толщины субволновых разделительных диэлектрических прослоек $\text{Ag-Na}_3\text{AlF}_6$ при сохранении суммарной толщины активного плазмонного слоя. Изменение интенсивности возбуждения в исследованном диапазоне энергий также сопровождается симметричным изменением амплитуды оптического отклика, при этом во всех случаях сохраняются его временные параметры.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ-ВАНТ проекта (Ф16В2-003, VAST.HTQT.BELARUS.02/16-17).

Acknowledgements. This work was partially financed according to the BRFFI-VANT Project (F16V2-003, VAST.HTQT.BELARUS.02/16-17).

Список использованных источников

1. Electron dynamics in metallic nanoparticles / J.-Y. Bigot [et al.] // *Chem. Phys.* – 2000. – Vol. 251, № 1/3. – P. 181–203.
2. Link, S. Optical Properties and Ultrafast Dynamics of Metallic Nanocrystals / S. Link, M. A. El-Sayed // *Annu. Rev. Phys. Chem.* – 2003. – Vol. 54, № 1. – P. 331–366.
3. Femtosecond transient absorption dynamics of closed-packed gold nanocrystal monolayer arrays / S.-K. Eah [et al.] // *Chem. Phys. Lett.* – 2004. – Vol. 386, № 4/6. – P. 390–395.
4. Drastic reduction of plasmon damping in gold nanorods / C. Sonnichsen [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – Vol. 88, № 7. – P. 077402–077404.
5. Teperik, T. Radiative decay of plasmons in a metallic nanoshell / T. Teperik, V. Popov, F. J. Garcia de Abajo // *Phys. Rev. B.* – 2004. – Vol. 69, № 15. – P. 155402–155407.
6. Kachan, S. M. Spectral properties of close-packed monolayers consisted of silver nanospheres / S. M. Kachan, A. N. Ponyavina // *J. Phys.: Cond. Mater.* – 2002. – Vol. 14, № 1. – P. 103–111.
7. Ultrafast spectral dynamics and electric properties of Cu/SiO₂ nanocomposites around the percolation threshold / O. V. Buganov [et al.] // *Proc. of 17th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology (NANO-2009)”*. – Minsk, 2009. – P. 93–94.
8. Dynamics of electron excitations in densely packed plasmonic $\text{Ag}/\text{Na}_3\text{AlF}_6$ nanostructures under pulsed laser action / O. V. Buganov [et al.] // *J. Appl. Spectrosc.* – 2011. – Vol. 78, № 5. – P. 686–691.
9. Properties of nanogranular metal–dielectric composites in strong electric fields and the cluster electronic states / L. V. Lutsev [et al.] // *Phys. Solid State.* – 2005. – Vol. 47, № 11. – P. 2169–2179.
10. Kachan, S. M. Spectral characteristics of confined photonic and plasmonic nanostructures / S. M. Kachan, A. N. Ponyavina // *Proc. SPIE.* – 2002. – Vol. 470. – P. 588–593.
11. Optical spectra of metal-dielectric nanocomposites with a layered subwave structure / A. D. Zamkovets [et al.] // *J. Appl. Spectrosc.* – 2003. – Vol. 70, № 4. – P. 593–598.
12. Stsiapura, V. I. Charge transfer process determines ultrafast excited state deactivation of thioflavin T in low-viscosity solvents / V. I. Stsiapura [et al.] // *J. Phys. Chem. A* – 2010. – Vol. 114, № 32. – P. 8345–8350.

References

1. Bigot J.-Y., Halte V., Merle J.-C., Daunois A. Electron dynamics in metallic nanoparticles. *Chemical Physics*, 2000, vol. 251, no. 1–3, pp. 181–203. Doi: 10.1016/s0301-0104(99)00298-0
2. Link S., El-Sayed M. A. Optical Properties and Ultrafast Dynamics of Metallic Nanocrystals. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2003, vol. 54, no. 1, pp. 331–366. Doi: 10.1146/annurev.physchem.54.011002.103759
3. Eah S.-K., Jaeger H. M., Scherer N. F., Lin X.-M., Wiederrecht G. P. Femtosecond transient absorption dynamics of closed-packed gold nanocrystal monolayer arrays. *Chemical Physics Letters*, 2004, vol. 386, no. 4–6, pp. 390–395. Doi: 10.1016/j.cplett.2004.01.056
4. Sonnichsen C., Franzl T., Wilk T., Von Plessen G., Feldmann J. Drastic reduction of plasmon damping in gold nanorods. *Physical Review Letters*, 2002, vol. 88, no. 7, pp. 077402–077404. Doi: 10.1103/physrevlett.88.077402
5. Teperik T., Popov V., Garcia de Abajo F. J. Radiative decay of plasmons in a metallic nanoshell. *Physical Review B*, 2004, vol. 69, no. 15, pp. 155402–155407. Doi: 10.1103/physrevb.69.155402
6. Kachan S. M., Ponyavina A. N. Spectral properties of close-packed monolayers consisted of silver nanospheres. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, vol. 14, no. 1, pp. 103–111. Doi: 10.1088/0953-8984/14/1/309
7. Buganov O. V., Kachan S. M., Ponyavina A. N., Svito I. A., Fedotova J. A., Fedotov A. K., Tikhomirov S. A. Ultrafast spectral dynamics and electric properties of Cu/SiO₂ nanocomposites around the percolation threshold. *Proceedings of 17th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology (NANO-2009)”*. Minsk, 2009, pp. 93–94.
8. Buganov O. V., Zamkovets A. D., Ponyavina A. N., Tikhomirov S. A., Baran L. V. Dynamics of electron excitations in densely packed plasmonic Ag/Na₃AlF₆ nanostructures under pulsed laser action. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2011, vol. 78, no. 5, pp. 686–691. Doi: 10.1007/s10812-011-9518-6
9. Lutsev L. V., Kopytin M. N., Sitnikov A. V., Stogney O. V. Properties of nanogranular metal-dielectric composites in strong electric fields and the cluster electronic states. *Physics of the Solid State*, 2005, vol. 47, no. 11, pp. 2169–2179. Doi: 10.1134/1.2131164
10. Kachan S. M., Ponyavina A. N. Spectral characteristics of confined photonic and plasmonic nanostructures. *Proceedings SPIE*, 2002, vol. 470, pp. 588–593.
11. Zamkovets A. D., Kachan S. M., Ponyavina A. N., Sil’vanovich N. I. Optical spectra of metal-dielectric nanocomposites with a layered subwave structure. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2003, vol. 70, no. 4, pp. 593–598. Doi: 10.1023/A:1026110817465
12. Stsiapura V. I., Maskevich A. A., Tikhomirov S. A., Buganov O. V. Charge transfer process determines ultrafast excited state deactivation of thioflavin T in low-viscosity solvents. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2010, vol. 114, no. 32, pp. 8345–8350. Doi: 10.1021/jp105186z

Информация об авторах

Замковец Анатолий Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики инфракрасных лучей, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.zamkovets@dragon.bas-net.by

Понявина Алина Николаевна – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории физики инфракрасных лучей, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ponyavin@imaph.bas-net.by

Буганов Олег Васильевич – кандидат физико-математических наук, заместитель заведующего лабораторией физики инфракрасных лучей, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: o.buganov@ifanbel.bas-net.by

Тихомиров Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент, заведующий лабораторией физики инфракрасных лучей, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.tik@ifanbel.bas-net.by

Information about the authors

Zamkovets Anatoly Dmitrievich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of Physics of Infrared Rays, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.zamkovets@dragon.bas-net.by

Ponyavina Alina Nikolaevna – D. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Physics of Infrared Rays, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ponyavin@imaph.bas-net.by

Buganov Oleg Vasil’evich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Deputy Head of the Laboratory of Physics of Infrared Rays, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.buganov@ifanbel.bas-net.by

Tikhomirov Sergei Aleksandrovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Corresponding Member, Head of the Laboratory of Physics of Infrared Rays, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.tik@ifanbel.bas-net.by

Фам Хон Мынь – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Вьетнамской академии наук и технологий (10, Dao Tan street, Cong Vi, Da Dinh, Hanoi, Vietnam). E-mail: phminh@iop.vast.ac.vn

Нгуен Тан Бынь – профессор, Институт физики Вьетнамской академии наук и технологий (10, Dao Tan street, Cong Vi, Da Dinh, Hanoi, Vietnam). E-mail: ntbinh@gmail.com

Нгуен Дай Хунг – профессор, Институт физики Вьетнамской академии наук и технологий (10, Dao Tan street, Cong Vi, Da Dinh, Hanoi, Vietnam). E-mail: daihung@iop.vast.ac.vn

Для цитирования

Спектрально-временная динамика нестационарного поглощения многослойных периодических плазмонных наноструктур / О. В. Буганов [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2017. – № 2. – С. 82–90.

Pham Hong Minh – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory, Institute of Physics of the Vietnam Academy of Science and Technology (10, Dao Tan Str., Cong Vi, Da Dinh, Hanoi, Vietnam). E-mail: phminh@iop.vast.ac.vn

Nguyen Thanh Binh – Professor, Institute of Physics of the Vietnam Academy of Science and Technology (10, Dao Tan Str., Cong Vi, Da Dinh, Hanoi, Vietnam). E-mail: phminh@iop.vast.ac.vn

Nguyen Dai Hung – Professor, Institute of Physics of the Vietnam Academy of Science and Technology (10, Dao Tan Str., Cong Vi, Da Dinh, Hanoi, Vietnam). E-mail: phminh@iop.vast.ac.vn

For citation

Buganov O. V., Zamkovets A. D., Ponyavina A. N., Tikhomirov S. A., Pham Hong Minh, Nguyen Thanh Binh, Nguyen Dai Hung. Spectral-temporal dynamics of transient absorption of multilayer periodic plasmonic nanostructures. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series], 2017, no. 2, pp. 82–90. (in Russian).