

А. Д. Замковец¹, А. Н. Понявина¹, Л. В. Баран²

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

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС В ПЛАНАРНЫХ СЛОИСТЫХ НАНОСТРУКТУРАХ СЕРЕБРО-ФТАЛОЦИАНИН НИКЕЛЯ

Изучены спектральные свойства тонких пленок фталоцианина никеля (NiPc) и серебра (Ag), полученных термическим осаждением в вакууме на стеклянные и кварцевые подложки (П), а также планарных гибридных наноструктур, в которых нанометровые пленки органического полупроводника контактируют с островковыми структурами серебра. Исследованы две конфигурации планарных гибридных наноструктур – монослой наночастиц серебра под пленкой фталоцианина никеля (П/Ag/NiPc) и монослой наночастиц серебра над пленкой фталоцианина никеля (П/NiPc/Ag). Толщина пленок NiPc изменялась от 10 до 30 нм. Поверхностная плотность металла составляла $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ г/см². С помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47-PRO в полуконтактном режиме изучена структура исследуемых наноструктур. Оптические спектры записывались на спектрофотометре Cary 500. Установлено, что присутствие наночастиц Ag наиболее значительно усиливает эффективное поглощение пленки NiPc толщиной ~ 10 нм в области электронных полос поглощения $\lambda \sim 600\text{--}700$ нм. Данный эффект проявляется за счет способности плазмонных наночастиц усиливать локальное поле вблизи своей поверхности на расстояниях, сравнимых с размерами наночастиц. Количественные оценки показали, что наличие наночастиц Ag приводит к увеличению оптической плотности на длине волны $\lambda = 625$ нм для наноструктур П/Ag/NiPc и П/NiPc/Ag соответственно на 25 и 33 %. Предполагается, что зависимость величины эффективного поглощения пленки NiPc от конструкции гибридной системы может быть связана с особенностями формирования наноструктур в процессе термического осаждения.

Ключевые слова: наноструктура, плазмонный резонанс, органический полупроводник, полоса поглощения.

A. D. Zamkovets¹, A. N. Ponyavina¹, L. V. Baran²

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

²Belarusian State University, Minsk, Belarus

PLASMON RESONANCE IN THE PLANAR LAYERED SILVER-NICKEL PHTHALOCYANINE NANOSTRUCTURES

Spectral properties of nickel phthalocyanine (NiPc) and silver (Ag) thin films, as well as of planar hybrid nanostructures composed of organic semiconductor nanometer films contacting with silver island structures were studied. All nanostructures were fabricated by thermal vacuum evaporation on glass and quartz substrates (S). Two configurations of planar hybrid nanostructures were investigated, in which the silver nanoparticle monolayer was placed under the NiPc film (S/Ag/NiPc) and over the NiPc film (S/NiPc/Ag). The NiPc film thickness was changed from 10 to 30 nm. The silver surface density was about $2 \cdot 10^{-6}$ g/cm². The surface structure of films was studied with the use of a scanning probe microscope “Solver P47 - PRO” in the semi-contact regime. Optical spectra were recorded by a spectrophotometer “Cary 500”. The most significant increase in the organic film absorption in a presence of Ag nanoparticles was observed for the NiPc film thickness of 10 nm over the spectral range of electronic absorption bands $\lambda \sim 600\text{--}700$ nm. The effect is due to the local field strengthening near the plasmonic nanoparticles surface for distances compared with nanoparticle sizes. Quantitative regards showed that for the nanostructures of S/Ag/NiPc and S/NiPc/Ag the existence of Ag nanoparticles leads to an increase in the optical density at the wavelength $\lambda = 625$ nm at 25 and 33 %, respectively. We suppose that the dependence of the NiPc film effective absorption on the hybrid nanostructure configuration may be related to the features of the nanostructure formation in the process of thermal evaporation.

Keywords: nanostructure, plasmon resonance, organic semiconductor, absorption band.

Введение. Важными элементами современной электронной техники становятся органические полупроводниковые материалы. Среди них одно из центральных мест занимают фталоцианины [1], характеризующиеся наличием делокализованных электронных состояний в цепях со-

пряжения, а также обладающие достаточно высокой устойчивостью к повышенным температурам и агрессивным средам. Эти свойства делают указанные материалы привлекательными для практического применения. Фталоцианины представляют интерес для создания светоизлучающих устройств [2] и фотовольтаических ячеек [3], обладают высокой чувствительностью к газам и могут использоваться как активные элементы сенсорных устройств [4]. Модифицируя данные органические материалы, можно изменять их проводимость, а также регулировать ширину запрещенной зоны. Такая уникальная возможность представляется чрезвычайно полезной для создания на их основе нового типа оптоэлектронных устройств различного назначения.

Перспективным является использование в сочетании с фталоцианинами наночастиц благородных металлов, характеризующихся наличием в видимом диапазоне полос поверхностного плазмонного резонансного поглощения (ППРП) и обладающих способностью усиливать локальные поля вблизи своей поверхности [5]. Такие объекты интенсивно исследуются в настоящее время. Их уникальные возможности уже находят применение в биологии и медицине, оптоэлектронике и информатике [6]. Плазмонные и плазмонно-фотонные структуры позволяют объединить в одном устройстве миниатюрность, присущую электронным схемам, и быстродействие, свойственное фотонным системам. Включение наночастиц с плазмонными свойствами в состав функциональных элементов и гибридных материалов, содержащих как неорганические, так и органические компоненты, открывает перспективы создания приборов и устройств нового поколения, параметры которых недостижимы для традиционных планарных технологий. Одной из важных задач в этой области является изучение закономерностей модификации спектральных характеристик гибридных систем различной топологии при световых воздействиях. В настоящей работе приводятся результаты исследования влияния наночастиц серебра на спектральные характеристики наноструктур серебро-фталоцианин никеля (Ag/NiPc).

Методика эксперимента. Наноструктуры изготавливались на вакуумной установке ВУ-1А последовательным термическим испарением компонентов на подложки (П) из оптического стекла и кварца. Температуры подложек были комнатными. Давление остаточных газов составляло $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Контроль толщин осаждаемых слоев производился кварцевым датчиком. Оптические спектры записывались на спектрофотометре Cary 500. Структура пленок изучалась с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47-PRO в полуконтактном режиме.

Обсуждение полученных результатов. Нами изготовлены и исследованы тонкие пленки NiPc и Ag, а также планарные гибридные наноструктуры П/Ag/NiPc и П/NiPc/Ag, в которых нанометровые пленки органического полупроводника контактируют с островковыми структурами серебра.

На рис. 1, *a* представлено АСМ-изображение сформированной на стеклянной подложке пленки NiPc толщиной ~ 10 нм. Из рисунка видно, что пленка состоит из нанокристаллитов с латеральными размерами порядка 20–30 нм. Средняя шероховатость поверхности пленки составляет 2–3 нм. На рис. 1, *b* приведено АСМ-изображение поверхности двухслойной наноструктуры П/NiPc/Ag, сформированной на стеклянной подложке. Обращает внимание то обстоятельство, что система П/NiPc/Ag отличается от пленки NiPc значительно большими размерами нанокристаллитов по вертикали (14–16 нм). Многие наночастицы имеют форму вытянутых пирамид (см. 3D-изображение поверхности этой наноструктуры на рис. 1, *c*). Анализируя возможные причины существенного увеличения неоднородности рельефа поверхности для системы П/NiPc/Ag по сравнению с пленкой NiPc, следует учитывать тот факт, что фталоцианины представляют собой молекулярные кристаллы [7], характеризующиеся наличием относительно слабых ван-дер-ваальсовых межмолекулярных взаимодействий. Для тонкой пленки NiPc (порядка 10 нм) на стеклянной подложке при комнатных температурах, как правило, формируется α -форма органического полупроводника [8]. Это косвенно подтверждается относительно небольшими размерами зерен на АСМ-снимке (менее 50 нм). Для β -фазы кристаллиты обычно являются более крупными [9]. По сравнению с β -формой α -модификация фталоцианинов характеризуется более слабыми межмолекулярными связями. Возможно, часть этих связей разрушается при термическом осаждении атомов Ag на поверхность NiPc, и наблюдается явление, подобное свеллингу (разбуханию) поверхности, приводящее к увеличению неоднородности рельефа.

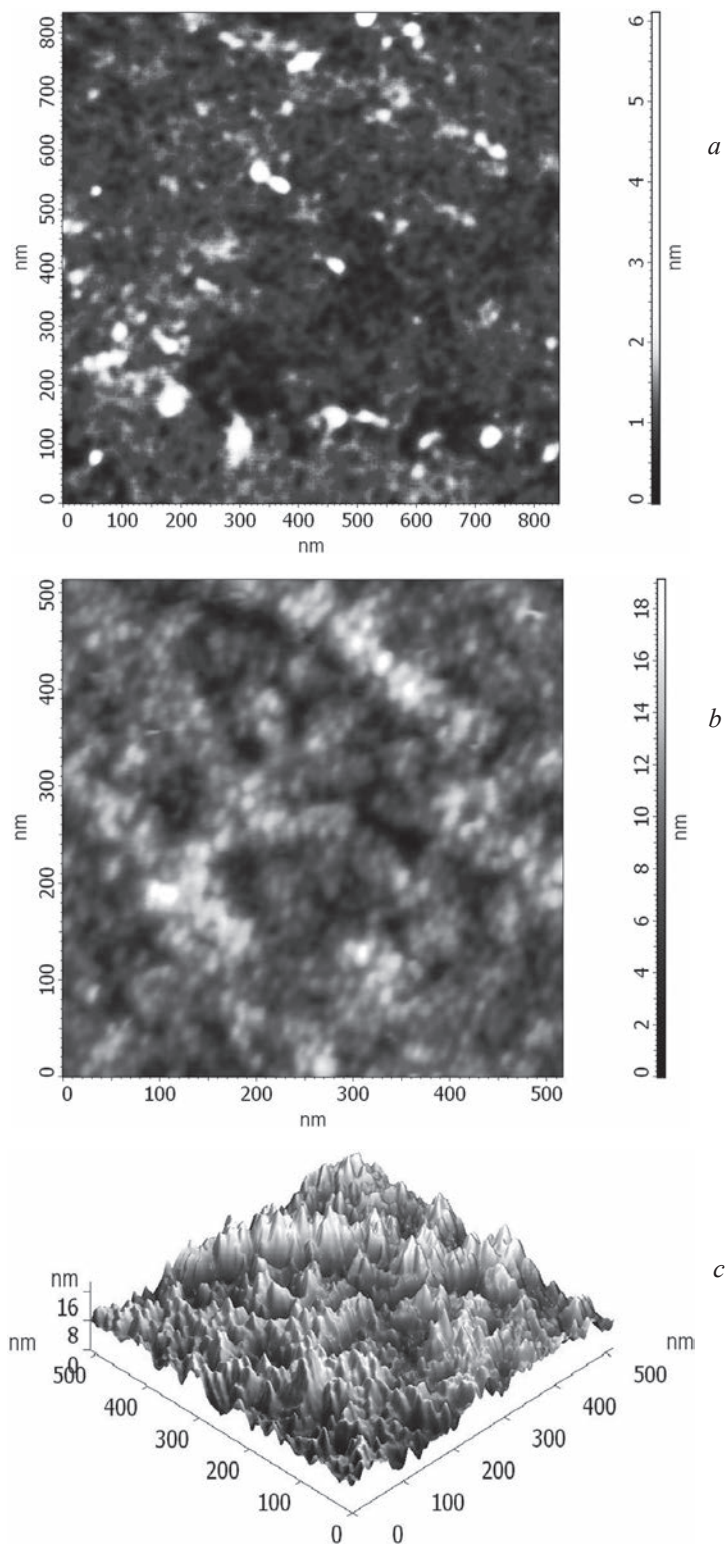


Рис. 1. АСМ-ізабражэнні паверхнасцей тонкай плёнкі NiPc (a) і двухслойнай наноструктуры П/NiPc/Ag (b, c) на шклянках; NiPc: $l \sim 10$ нм; Ag: ППМ $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ г/см², параметр перакрывання $\eta \sim 0,45$

Fig. 1. AFM-images of surfaces of NiPc thin film (a) and S/NiPc/Ag two-layered nanostructure (b, c) on glass substrates; NiPc: $l \sim 10$ nm; Ag: MSD $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ g/cm², overlap parameter $\eta \sim 0.45$

На рис. 2, a (крывая 1) прыведен спектр оптычнай шчынасці нанаслоя сярэбра з паверхнавай шчынасцю металу (ППМ) $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ г/см² на кварцавай падложцы. В абласці дзяржэнняў $\lambda \sim 400\text{--}550$ нм для гэтага слоя наблідаецца паласа ППРП з максімумам на дзяржэнні

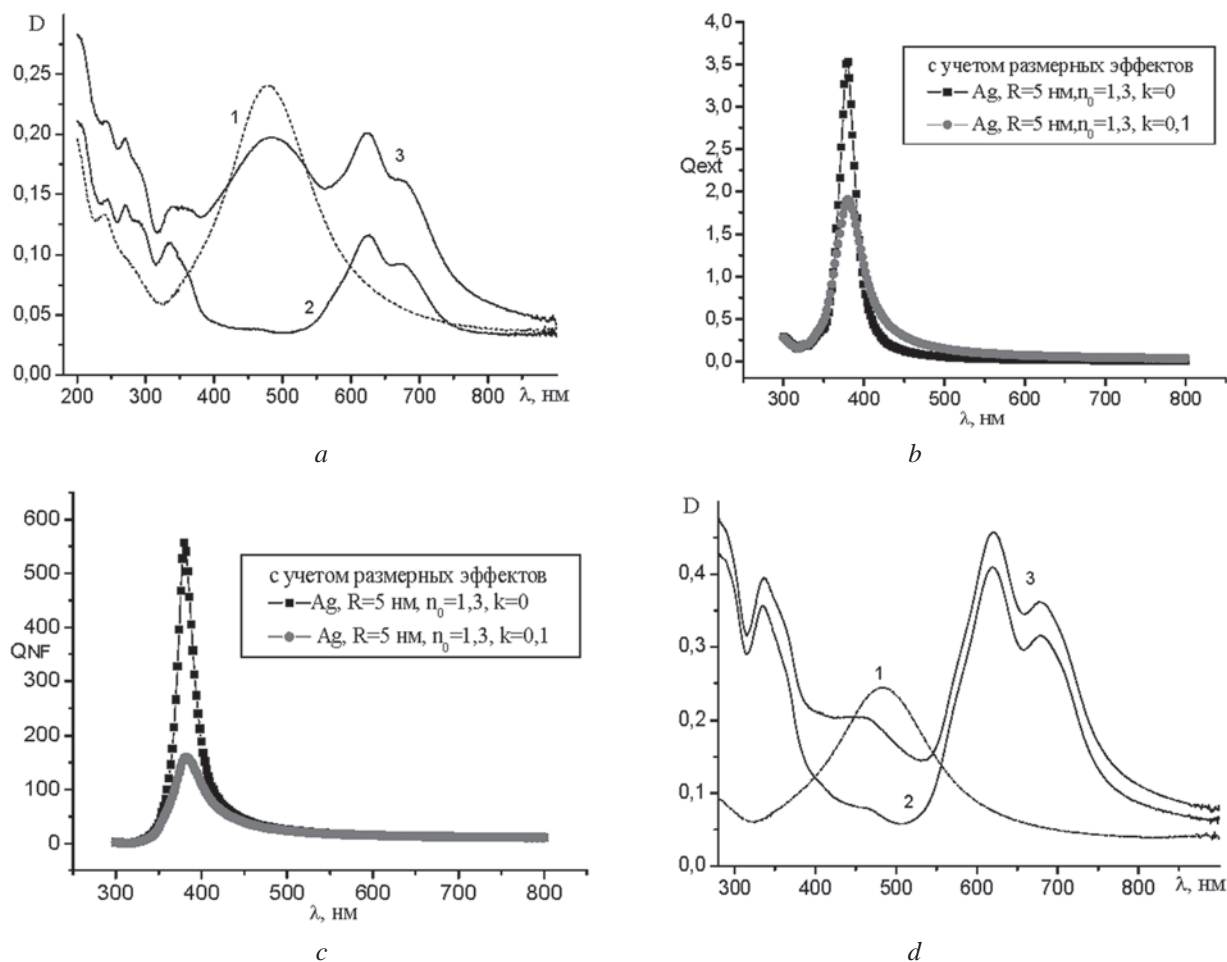


Рис. 2. Оптическая плотность нанослоя Ag (кривая 1, *a, d*), пленки NiPc (кривая 2) и наноструктуры П/NiPc/Ag (кривая 3) на кварцевых подложках; NiPc: $l \sim 10$ нм (*a*) и ~ 30 нм (*d*); Ag: ППМ $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ г/см², $\eta \sim 0,45$. Рассчитанные с использованием теории Ми факторы эффективности ослабления (*b*) и рассеяния в ближней зоне (*c*) для наносферы серебра ($R = 5$ нм) в матрице с $n_0 = 1,3$ без поглощения ($k = 0$) и с поглощением ($k = 0,1$)

Fig. 2. Optical density of Ag nanolayer (curve 1, *a, d*), NiPc film (curve 2) and S/NiPc/Ag nanostructure (curve 3) on quartz substrates; NiPc: $l \sim 10$ nm (*a*) and ~ 30 nm (*d*); Ag: MSD $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ g/cm², $\eta \sim 0,45$. Efficiency factors of extinction (*b*) and scattering in near field (*c*) calculated with the use of the Mie theory for the silver nanosphere ($R = 5$ nm) in the matrix of $n_0 = 1.3$ without ($k = 0$) and with absorption ($k = 0.1$)

$\lambda = 485$ нм. Наличие этой полосы свидетельствует о том, что пленка Ag – наноструктурированная. Кривая 2 на рис. 2, *a* является спектральной характеристикой пленки NiPc толщиной ~ 10 нм, сформированной на кварцевой подложке. Данная пленка имеет полосы поглощения в УФ-диапазоне и на длинах волн 600–700 нм, связанные с электронными переходами (полосы *Core* и *Q* соответственно [10]). Полоса *Q* при этом состоит из двух компонент с максимумами на $\lambda = 625$ и $\lambda = 675$ нм, из которых более интенсивная – с максимумом на длине волны $\lambda = 625$ нм.

Кривая 3 на рис. 2, *a* соответствует оптической плотности двухслойной системы П/NiPc/Ag, расположенной на кварцевой подложке. Для этой системы в спектральном диапазоне $\lambda \sim 450$ –550 нм проявляется полоса ППРП, а на длинах волн $\lambda \sim 550$ –700 нм наблюдаются электронные полосы поглощения NiPc. Влияние наночастиц серебра на поглощение пленки фталоцианина никеля можно оценить, сравнивая оптическую плотность гибридной системы (кривая 3) с суммой оптических плотностей составляющих компонентов (кривые 1 и 2). Видно, что в присутствии наночастиц серебра достигается существенное увеличение оптической плотности пленки фталоцианина никеля в области электронных полос поглощения.

Интенсивность полосы поверхностного плазмонного резонансного поглощения в системе П/NiPc/Ag уменьшилась по сравнению с нанослоем Ag (кривая 1), что является следствием имеющих различия в свойствах поверхностей, на которые производилось осаждение серебра

при формировании нанослоя и двухслойной наноструктуры. Во-первых, шероховатость поверхности NiPc может быть причиной более высокой степени полидисперсности наночастиц серебра. Это должно привести к уширению полосы ПППП с одновременным уменьшением ее интенсивности. К тому же ослаблению полосы ПППП может способствовать наличие поглощения в нанослое NiPc, на котором размещены наночастицы серебра, подобно тому, как это происходит в поглощающих матрицах (см. рис. 2, *b*, *c*). Расчеты факторов эффективности ослабления (Q_{ext}) и рассеяния в ближней зоне (Q_{NF}) проводились с использованием теории Ми. Значения оптических постоянных серебра брались из [11]. Размерная зависимость оптических постоянных металлических наночастиц учитывалась в рамках модели ограничения длины свободного пробега электронов [12]. В соответствии с этой моделью диэлектрическая проницаемость, обусловленная вкладом свободных электронов, рассчитывается по формуле Друде с учетом увеличения постоянной затухания из-за столкновений свободных электронов с поверхностью, ограничивающей металл. Согласно [12], размерно-зависимая постоянная затухания имеет вид

$$\gamma_R = \gamma_0 + \frac{v_F}{L},$$

где v_F – скорость электрона на поверхности Ферми, γ_0 – средняя частота столкновений (т. е. постоянная затухания) в объемном веществе, а L – эффективная средняя длина пробега электрона до столкновения с границей. В предположении изотропного рассеяния на границе для сферической частицы $L = R$ (R – радиус частицы).

Как видно из рис. 2 *b*, *c*, в рассматриваемом случае увеличение мнимой части комплексного показателя преломления k от 0 до 0,1 приводит к существенному уменьшению факторов Q_{ext} и Q_{NF} . При этом особенно сильно уменьшается фактор рассеяния в ближней зоне Q_{NF} .

Рис. 2, *d* отличается от рис. 2, *a* тем, что толщина пленки NiPc здесь составляет ~ 30 нм. Увеличение толщины приводит к возрастанию интенсивности полос поглощения органического полупроводника в УФ- и видимом диапазонах. Однако относительный эффект усиления поглощения пленки NiPc в области 550–700 нм в присутствии плазмонных наночастиц существенно ниже по сравнению с более тонкой пленкой NiPc. Это связано с тем, что в пленке NiPc большей толщины лишь малая часть органического полупроводника попадает в зону усиления локального поля вблизи поверхности плазмонных наночастиц [13].

На рис. 3 приведены спектры оптической плотности наноструктуры П/Ag/NiPc (кривая 1), нанослоя Ag с ППМ $\sim 1,7 \cdot 10^{-6}$ г/см² (кривая 2), а также пленки NiPc толщиной ~ 10 нм (кривая 3), сформированных на стеклянных подложках. Видно, что в отличие от наноструктур П/NiPc/Ag, спектральные характеристики которых представлены выше, оптическая плотность двухслойной наноструктуры П/Ag/NiPc в области спектра $\lambda \sim 400$ –500 нм превышает оптическую плотность нанослоя Ag, т. е. в данном случае не происходит ослабления полосы плазмонного поглощения.

Для более детального установления степени влияния наночастиц серебра на оптические свойства пленок фталоцианина никеля нами была проведена обработка оптических спектров двухслойных наноструктур, заключающаяся в вычитании из них поглощения соответствующих

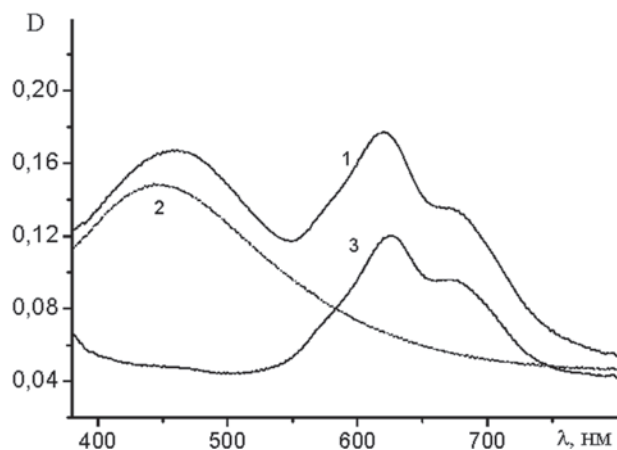


Рис. 3. Оптическая плотность наноструктуры П/Ag/NiPc (кривая 1), нанослоя Ag (кривая 2) и пленки NiPc (кривая 3) на стеклянных подложках; толщина NiPc ~ 10 нм
Fig. 3. Optical density of S/Ag/NiPc nanostructure (curve 1), Ag nanolayer (curve 2) and NiPc film (curve 3) on glass substrates; the NiPc film thickness of ~ 10 nm

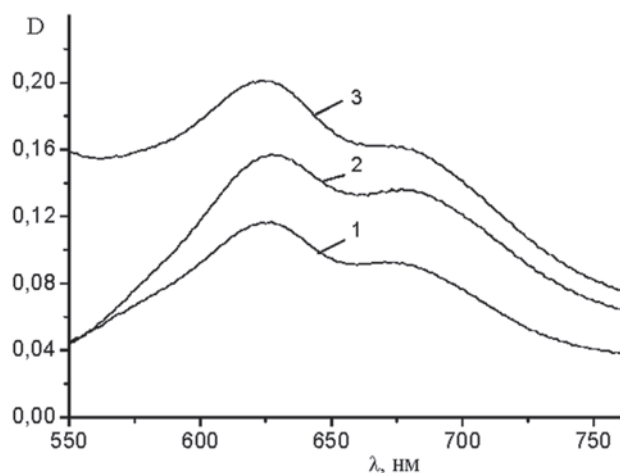


Рис. 4. Оптическая плотность пленки NiPc толщиной ~ 10 нм (кривая 1) и разностные спектры оптической плотности ($D_{\Pi/\text{NiPc}/\text{Ag}} - D_{\text{Ag}}$) (кривая 2) и ($D_{\text{S}/\text{Ag}/\text{NiPc}} - D_{\text{Ag}}$) (кривая 3) таких же по толщине пленок NiPc, расположенных соответственно в наноструктурах $\Pi/\text{Ag}/\text{NiPc}$ и $\Pi/\text{NiPc}/\text{Ag}$

Fig. 4. Optical density of the NiPc film of the thickness of ~ 10 nm (curve 1) and differential spectra of optical density ($D_{\text{S}/\text{Ag}/\text{NiPc}} - D_{\text{Ag}}$) (curve 2) and ($D_{\Pi/\text{NiPc}/\text{Ag}} - D_{\text{Ag}}$) (curve 3) for the NiPc films of the same thickness placed in the S/Ag/NiPc and S/NiPc/Ag nanostructures, respectively

нанослоев Ag. Разностные спектры оптической плотности ($D_{\Pi/\text{NiPc}/\text{Ag}} - D_{\text{Ag}}$) и ($D_{\Pi/\text{Ag}/\text{NiPc}} - D_{\text{Ag}}$) для систем $\Pi/\text{NiPc}/\text{Ag}$ и $\Pi/\text{Ag}/\text{NiPc}$ в спектральном диапазоне $\lambda > 550$ нм приведены на рис. 4 (кривые 2 и 3 соответственно). В этом спектральном диапазоне находятся полосы поглощения NiPc с максимумами на длинах волн 625 и 675 нм, а также располагается длинноволновое крыло полосы ППРП монослоя наночастиц Ag. Как видно из рис. 4, для пленки NiPc толщиной 10 нм, входящей в состав наноструктуры $\Pi/\text{NiPc}/\text{Ag}$, в области спектра $\lambda = 600\text{--}700$ нм достигается более высокое эффективное поглощение по сравнению с пленкой, расположенной в наноструктуре $\Pi/\text{Ag}/\text{NiPc}$. Наличие наночастиц Ag приводит к увеличению оптической плотности на длине волны $\lambda = 625$ нм для систем $\Pi/\text{Ag}/\text{NiPc}$ и $\Pi/\text{NiPc}/\text{Ag}$ соответственно на 25 и 33 %.

Такой результат может быть частично связан с особенностями формирования наноструктур в процессе термического осаждения. Для структуры $\Pi/\text{Ag}/\text{NiPc}$ осаждение NiPc происходит на уже сформированные на подложке наночастицы Ag, и молекулы органического полупроводника могут контактировать лишь с атомами серебра, находящимися на поверхности металлических наночастиц. Атомы серебра в наночастицах удерживаются достаточно сильными химическими связями, обусловленными взаимодействием ионов металла с валентными электронами, и их миграция в процессе осаждения органических молекул крайне затруднена. При осаждении серебра на NiPc на начальной стадии практически каждый атом металла может контактировать с поверхностью NiPc. Размеры молекул NiPc существенно превышают размеры атомов Ag, и поверхность органического полупроводника даже в пределах одной молекулы является для атомов Ag неоднородной по потенциалу. К тому же имеются области, где ван-дер-ваальсово взаимодействие между молекулами NiPc минимально (например, такая ситуация может реализоваться там, где пленка имеет аморфную структуру), а также такие, где это взаимодействие сильнее (крупные нанокристаллиты). В результате формирование в процессе термического осаждения нанослоя Ag может сопровождаться возникновением и накоплением значительных механических напряжений в наноструктуре, которые могут приводить к увеличению неоднородности рельефа поверхности NiPc вследствие ее деформации (см. рис. 1, b) и способствовать образованию большой площади интерфейса металл-органический полупроводник. В такой структуре при воздействии световых волн, несмотря на некоторое ослабление полосы ППРП, по-видимому достигается высокая интенсивность локального поля, приводящая к увеличению эффективного поглощения пленки NiPc.

Заключение. Таким образом, исследованы полученные термическим испарением в вакууме тонкие пленки NiPc и Ag, а также планарные гибридные наноструктуры $\Pi/\text{Ag}/\text{NiPc}$ и $\Pi/\text{NiPc}/\text{Ag}$, в которых нанометровые пленки органического полупроводника контактируют с нанослоями серебра. Показано, что наличие плазмонных наночастиц наиболее значительно усиливает эффективное поглощение пленки NiPc толщиной ~ 10 нм в наноструктуре $\Pi/\text{NiPc}/\text{Ag}$ в области электронных полос поглощения $\lambda \sim 600\text{--}700$ нм. Данный эффект проявляется за счет способности плазмонных наночастиц усиливать локальное поле вблизи своей поверхности на расстояниях, сравнимых с размерами наночастиц.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф15-092).

Acknowledgements

This work was partially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Grant N F15-092)..

Список использованных источников

1. Leznoff, C. C. Phthalocyanines: properties and applications / C. C. Leznoff, A. B. P. Lever. – Weinheim: VCH, 1996. – Vol. 4. – 536 p.
2. Hohnholza, D. Applications of phthalocyanines in organic light emitting devices / D. Hohnholza, S. Steinbrecherb, M. Hanacka // J. Mol. Struct. – 2000. – Vol. 521. – P. 231–237.
3. Itoh Eiji. Photovoltaic Properties of Organic *p-n* Junction Devices Consisting of Phthalocyanine and *n*-Type Porphyrin Deposited on an *n*-Type TiO₂ Layer / Itoh Eiji, Ohmori Yuji, Miyairi Keiichi // Japan. J. Appl. Phys. – 2004. – Vol. 43, no 2. – P. 817–821.
4. Van Flassen, E. Explanation of the low oxygen sensitivity of thin film phthalocyanine gas sensors / E. Van Flassen, H. Kerp // Sens. Actuators B. – 2003. – Vol. 88. – P. 329–333.
5. Bohren, C. F. Absorption and Scattering of Light by Small Particles / C. F. Bohren, D. R. Huffman. – John Wiley&Sons, Inc., 1983. – 660 p.
6. Климов, В. В. Наноплазмоника / В. В. Климов. – М.: Физматлит, 2009. – 480 с.
7. Китайгородский, А. И. Молекулярные кристаллы / А. И. Китайгородский. – М.: Наука, 1971. – 424 с.
8. Thin and ultra-thin films of nickel phthalocyanine grown on highly oriented pyrolytic graphite: an XPS, UHV, and air tapping mode AFM study / L. Ottaviano [et al.] // Surf. Sci. – 1977. – Vol. 373. – P. 318–332.
9. Поуп, М. Электронные процессы в органических кристаллах / М. Поуп, Ч. Свенберг. – М.: Мир, 1985. – Т. 2. – 168 с.
10. Electronic structure and spectrum third-order nonlinear optics of the metal phthalocyanines PcM (M= Zn, Ni, TiO) / W.-D. Cheng [et al.] // Phys. Rev. B. – 2001. – Vol. 64. – P. 125109–125109-11.
11. Johnson, P. Optical constants of the noble metals / P. Johnson, R. Christy // Phys. Rev. B. – 1972. – Vol. 6. – P. 4370–4379.
12. Width of cluster plasmon resonances: Bulk dielectric functions and chemical interface damping / H. Hovel [et al.] // Phys. Rev. B. – 1993. – Vol. 48. – P. 18148–18154.
13. Zamkovets, A. D. Near-field effects on spectral properties of layered silver-copper phthalocyanine nanocomposites / A. D. Zamkovets, A. N. Ponyavina // J. Appl. Spectrosc. – 2013. – Vol. 79, N 6. – P. 908–913.

References

1. Leznoff C.C., Lever A.B.P. *Phthalocyanines: properties and applications. Vol.4*. Weinheim: VCH, 1996. 536p.
2. Hohnholza D, Steinbrecherb S., Hanacka M. Applications of phthalocyanines in organic light emitting devices. *Journal of Molecular Structure*, 2000, vol. 521, no. 1–3, pp. 231–237. doi:10.1016/S0022-2860(99)00438-X.
3. Itoh E., Ohmori Y., Miyairi K. Photovoltaic Properties of Organic *p-n* Junction Devices Consisting of Phthalocyanine and *n*-Type Porphyrin Deposited on an *n*-Type TiO₂ Layer. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 43, no. 2, pp. 817–821. doi: 10.1143/jjap.43.817.
4. Van Faassen E., Kerp H. Explanation of the low oxygen sensitivity of thin film phthalocyanine gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, vol. 88, no. 3, pp. 329–333. doi: 10.1016/S0925-4005(02)00379-9.
5. Bohren C.F., Huffman D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. John Wiley&Sons, Inc., 1983. 660 p.
6. Klimov V.V. *Nanoplasmonics*. Moscow, Fizmatlit, 2009. 480 p. (in Russian)
7. Kitaygorodskiy A.I. *Molecular crystals*. Moscow, Nauka, 1971. 424 p. (in Russian)
8. Ottaviano L., Di Nardo S., Lozzi L., Passacantando M., Picozzi P., Santucci S. Thin and ultra-thin films of nickel phthalocyanine grown on highly oriented pyrolytic graphite: an XPS, UHV, and air tapping mode AFM study. *Surface Science*, 1977, vol. 373, no. 2–3, pp. 318–332. doi:10.1016/S0039-6028(96)01179-X.
9. Pope M., Swenberg Ch. *Electronic Processes in Organic Crystals*. NY, Clarendon Press, 1982.
10. Cheng W.-D., Wu D.-S., Zhang H., Chen J.-T. Electronic structure and spectrum third-order nonlinear optics of the metal phthalocyanines PcM (M= Zn, Ni, TiO). *Physical Review B*, 2001, vol. 64, no. 12, pp. 125109–125109-11. doi: 10.1103/physrevb.64.125109.
11. Johnson P., Christy R. Optical constants of the noble metals. *Physical Review B*, 1972, vol. 6, no. 12, pp. 4370–4379. doi: 10.1103/physrevb.6.4370.
12. Hovel H., Fritz S., Hilger A., Kreibitz U., Vollmer M. Width of cluster plasmon resonances: Bulk dielectric functions and chemical interface damping. *Physical Review B*, 1993, vol.48, no. 24, pp.18148–18154. doi: 10.1103/physrevb.48.18178.
13. Zamkovets A.D., Ponyavina A.N. Near-field effects on spectral properties of layered silver-copper phthalocyanine nanocomposites. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2013, vol. 79, no. 6, pp. 908–913. doi: 10.1007/s10812-013-9693-8.

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: ponyavina@imaph.bas-net.by

Баран Людмила Владимировна – кандидат физико-математических наук, заведующий сектором обслуживания научных исследований на кафедре твердого тела, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: brlv@mail.ru

Для цитирования

Замковец, А. Д. Плазмонный резонанс в планарных слоистых наноструктурах серебро-фталоцианин никеля / А. Д. Замковец, А. Н. Понявина, Л. В. Баран // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2016. – № 4. – С. 98–105.

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), Assistant 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: ponyavina@imaph.bas-net.by

Baran Ludmila Vladimirovna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Department for Scientific-Research Service, Department of Physics of Solid States, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: brlv@mail.ru

For citation

Zamkovets A. D., Ponyavina A.N., Baran L.V. Plasmon resonance in the planar layered silver-nickel phthalocyanine nanostructures. *Vesti Natsyional'noi akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series], 2016, no. 4, pp. 98–105. (in Russian)