

ISSN 1561-2430 (Print)  
ISSN 2524-2415 (Online)  
УДК 535.34  
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-3-242-251>

Поступила в редакцию 23.05.2024  
Received 23.05.2024

А. Д. Замковец<sup>1</sup>, С. А. Тихомиров<sup>1</sup>, Л. В. Баран<sup>2</sup>, А. С. Кузьмицкая<sup>3</sup>,  
В. В. Малютина-Бронская<sup>3</sup>, И. Ю. Фролов<sup>3</sup>, Фам Ван Дуонг<sup>4</sup>, Фам Хон Мынь<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>Институт физики Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой,  
Социалистическая Республика Вьетнам

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ, МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ НАНОСТРУКТУР СЕРЕБРА

**Аннотация.** Исследованы оптические, морфологические и электрофизические свойства изготовленных электронно-лучевым испарением и подвергнутых отжигу при температурах 145 и 195 °С наноструктур серебра. Все образцы характеризуются наличием в видимом диапазоне выраженной полосы поверхностного плазмонного резонанса поглощения и представляют собой плотноупакованные монослои наночастиц, средние размеры которых увеличиваются от ~10 нм в исходных образцах до ~35–40 и ~45–60 нм в отожженных в зависимости от температуры отжига. Обсуждается влияние на спектральные характеристики образцов различных факторов, в том числе размеров наночастиц и электродинамических взаимодействий между наночастицами. Показано, что все исследованные гранулированные наноструктуры, как исходные, так и подвергнутые отжигу, являются высокоомными. Установлено, что для исходного и отожженного при 145 °С образцов вблизи малых значений подаваемого напряжения прослеживается зависимость тока от длины волны облучения с изменением его величины до двух порядков для определенных длин волн.

**Ключевые слова:** наночастицы серебра, поверхностный плазмонный резонанс, электродинамические взаимодействия, вольт-амперная характеристика, фотопроводимость

**Для цитирования.** Влияние отжига на оптические, морфологические и электрофизические свойства гранулированных наноструктур серебра / А. Д. Замковец [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2024. – Т. 60, № 3. – С. 242–251. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-3-242-251>

Anatoly D. Zamkovets<sup>1</sup>, Sergey A. Tikhomirov<sup>1</sup>, Ludmila V. Baran<sup>2</sup>, Hanna S. Kuzmitskaya<sup>3</sup>,  
Victoriya V. Malyutina-Bronskaya<sup>3</sup>, Igor Y. Frolov<sup>3</sup>, Pham Van Duong<sup>4</sup>, Pham Hong Minh<sup>4</sup>

<sup>1</sup>B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarussian State University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, Minsk, Republic of Belarus

<sup>4</sup>Institute of Physics of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam

## INFLUENCE OF ANNEALING ON OPTICAL, MORPHOLOGICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF GRANULAR SILVER NANOSTRUCTURES

**Abstract.** The optical, morphological and electrophysical properties of silver nanostructures fabricated by electron beam evaporation and annealed at temperatures of 145 and 195 °C were studied. All samples are characterized by the presence of a pronounced surface plasmon absorption resonance band in the visible range and represent close-packed monolayers of nanoparticles, the average sizes of which increase from ~10 nm in the original samples to ~35–40 nm and ~45–60 nm in the annealed ones, depending on the annealing temperature. The influence of various factors on the spectral characteristics of samples, including the size of nanoparticles and electrodynamic interactions between nanoparticles, is discussed. It has been shown that all granular nanostructures studied, both initial and annealed, are highly resistive. It has been established that for the initial and annealed at 145 °C samples, near low values of the applied voltage, a dependence of the current on the irradiation wavelength can be traced, with its value changing up to two orders of magnitude for certain wavelengths.

**Key words:** silver nanoparticles, surface plasmon resonance, electrodynamic interactions, volt-ampere characteristics, photoconductivity

**For citation.** Zamkovets A. D., Tikhomirov S. A., Baran L. V., Kuzmitskaya H. S., Malyutina-Bronskaya V. V., Frolov I. Y., Pham Van Duong, Pham Hong Minh. Influence of annealing on optical, morphological and electrophysical properties of granular silver nanostructures. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2024, vol. 60, no. 3, pp. 242–251 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-3-242-251>

**Введение.** Последние десятилетия характеризуются высоким спросом на функциональные материалы нового поколения, необходимые для развития нанофотоники, оптоэлектроники и наносенсорики [1]. Среди таких материалов важное место занимают плазмонные наноструктуры, содержащие наночастицы благородных металлов и обладающие уникальными свойствами, обусловленными наличием полос поверхностного плазмонного резонанса поглощения (ППРП) в видимой и ближней ИК-областях спектра [2–4]. Полосы ППРП отличаются высокой чувствительностью к форме и размеру металлических наночастиц, а также к диэлектрическим характеристикам окружающей среды, что уже находит свое применение при разработке новых типов сенсоров [5–7]. Второе важное свойство плазмонных наноструктур, заключающееся в способности значительно усиливать локальные поля вблизи поверхности металлической наночастицы, используется специалистами при создании субстратов для гигантского комбинационного рассеяния, оптимизации характеристик светоизлучающих диодов, фотоприемников и фотовольтаических ячеек [8–10]. Большое число работ посвящено изучению электрофизических свойств нано- и микроструктур благородных металлов [11–14]. В частности, установлено, что наличие вблизи поверхностей металлических наночастиц локальных полей высокой интенсивности обеспечивает возможность использовать близкорасположенные друг от друга частицы для передачи электромагнитной энергии не только по закругленным траекториям большой кривизны, но и резко изломанным [15, 16]. Обнаружено, что металлические пленки малой толщины, при пропускании через них электрического тока, демонстрируют наличие электронной эмиссии и свечения (electron and light emission) [17, 18], что может быть использовано при изготовлении плоских дисплеев. Вместе с тем вопросы установления взаимосвязи морфологии таких структур с их оптическими и электрофизическими свойствами изучены недостаточно. Установление подобной взаимосвязи может быть полезным при разработке новых функциональных оптоэлектронных элементов, в которых эффекты ближнего поля используются для управления их электрофизическими характеристиками.

В настоящей работе рассматривается влияние отжига на оптические, морфологические и электрофизические свойства гранулированных наноструктур серебра, для которых, в сравнении с другими благородными металлами, достигается наиболее высокая добротность полосы ППРП [2].

**Методы исследования.** Экспериментальные образцы изготавливались электронно-лучевым испарением и последующей конденсацией атомов серебра на стеклянные подложки. Подложки предварительно прогревались до 100 °С для удаления паров воды, затем охлаждались до 50 °С и при данной температуре осуществлялось нанесение покрытия. Давление остаточных газов в рабочей камере составляло (1–2)  $10^{-3}$  Па. Скорость осаждения составляла порядка 0,02 нм/с. Контроль толщины пленки осуществлялся фотометрически по ослаблению пропускания в области полосы ППРП. Спектральные характеристики образцов записывались на спектрофотометре Cary 500. Морфология поверхности пленок исследовалась с помощью сканирующего зондового микроскопа NEXT II (ООО «НТ-МДТ», Россия) в режиме амплитудно-частотной модуляции методом постоянной силы [19]. Использовались бесконтактные кремниевые кантилеверы вискерного типа с радиусом кривизны кончика иглы не более 3 нм. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур Ag/стекло и их зависимостей от длины волны облучения проводилось с помощью автоматизированного базового лазерного испытательного комплекса с мультиспектральным источником лазерного излучения (набор лазерных диодов с длинами волн 405, 450, 520, 660, 780, 808, 905, 980 и 1064 нм) с общим оптоволоконным выводом и калиброванной мощностью излучения порядка 2 мВт [20]. Все измерения были выполнены при комнатной температуре. Отжиг образцов производился в сушильном шкафу с выдержкой в течение 20 мин при температуре 145 и 195 °С.

**Обсуждение полученных результатов.** На рис. 1 приведены спектры оптической плотности исходной (кривая 1) и отожженных при температуре 145 (кривая 2) и 195 °С (кривая 3) наноструктур серебра. Как видно, все образцы характеризуются наличием в видимом диапазоне выраженной полосы ППРП. Показанные на рис. 1 спектры типичны для трех групп исследованных образцов (три исходные и по три отожженные при двух температурах). Отличия в спектральном положении максимумов полос ППРП для образцов одной группы не превышали 10 нм для исходных пленок и 20 нм для отожженных. Максимум полосы ППРП исходной пленки Ag

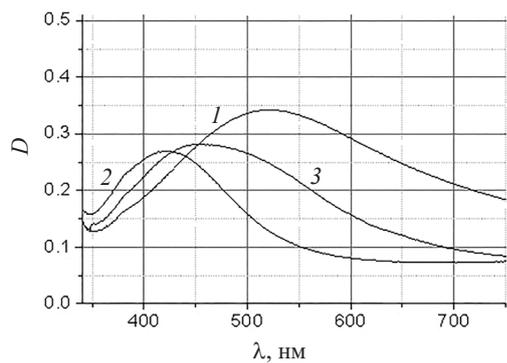


Рис. 1. Спектры оптической плотности наноструктур серебра на стеклянных подложках до отжига (1) и после отжига при температуре 145 (2) и 195 °С (3)

Fig. 1. Optical density spectra of silver nanostructures on glass substrates before annealing (1) and after annealing at temperatures of 145 (2) and 195 °C (3)

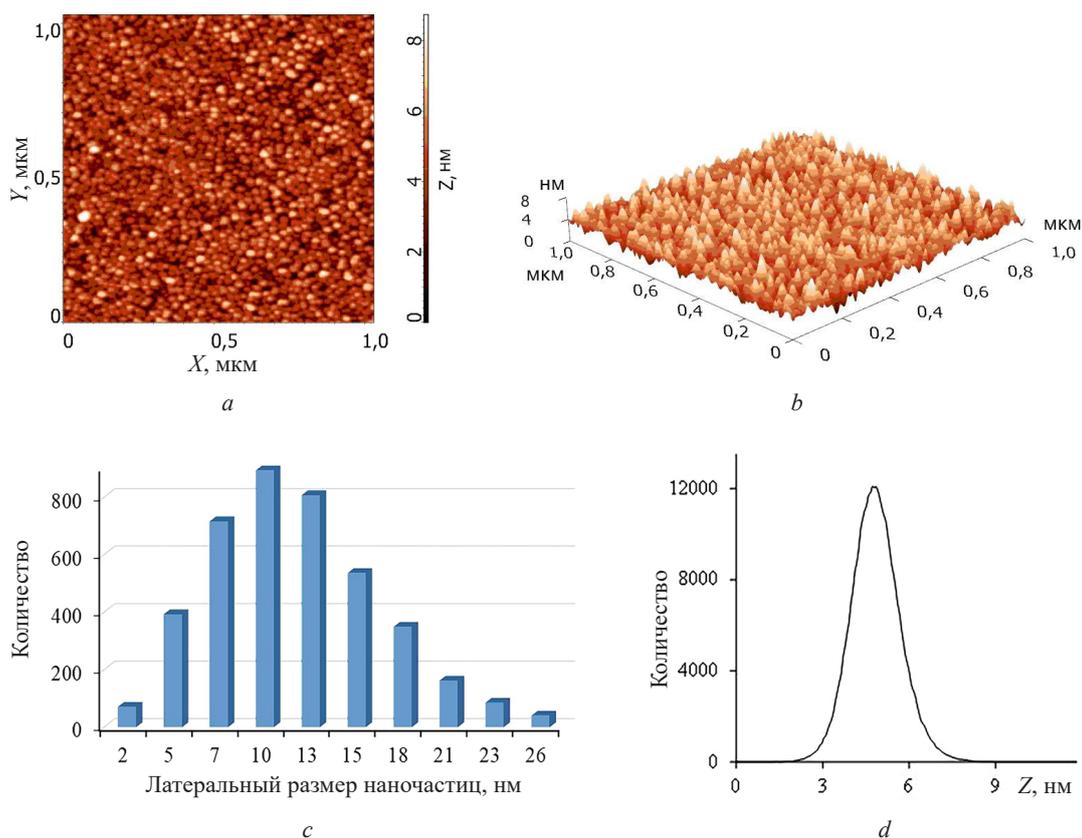


Рис. 2. 2D- (a) и 3D-изображения (b) рельефа поверхности исходной пленки серебра, гистограммы распределения в ней наночастиц по размерам (c) и значений Z неоднородностей поверхности (d)

Fig. 2. 2D (a) and 3D (b) images of the surface relief of the initial silver film, histograms of the size distribution of nanoparticles in it (c) and Z values of surface inhomogeneities (d)

располагается на длине волны  $\lambda \approx 525$  нм. После отжига при температуре 145 °С происходит коротковолновый сдвиг максимума полосы ППРП до  $\lambda \approx 420$  нм. Одновременно наблюдается уменьшение интенсивности полосы и ее сужение (кривая 2 на рис. 1). Подобные изменения отмечаются в литературе [21], однако причины таких изменений не анализируются. Увеличение температуры отжига до 195 °С сопровождается длинноволновым сдвигом максимума полосы ППРП до  $\lambda \approx 450$  нм, который тем не менее является коротковолновым относительно исходной пленки. При этом существенно увеличивается полуширина полосы ППРП, а ее интенсивность остается практически без изменений (кривая 3 на рис. 1).

На рис. 2 приведены соответственно 2D- и 3D-изображения рельефа поверхности исходной пленки серебра, а также распределение частиц в этой пленке по размерам и гистограмма шероховатости ее поверхности. Анализ данных рис. 2 показывает, что средние латеральные размеры

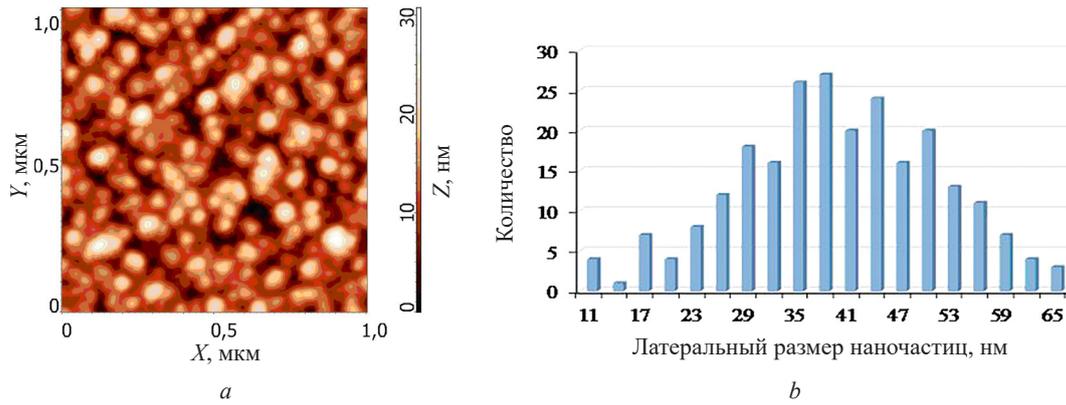


Рис. 3. 2D-изображение рельефа поверхности (a) пленки серебра, отожженной при температуре 145 °С, и гистограмма распределения в ней наночастиц по размерам (b)

Fig. 3. 2D image of the surface relief (a) of a silver film annealed at temperature of 145 °C, and histogram of the size distribution of nanoparticles in it (b)

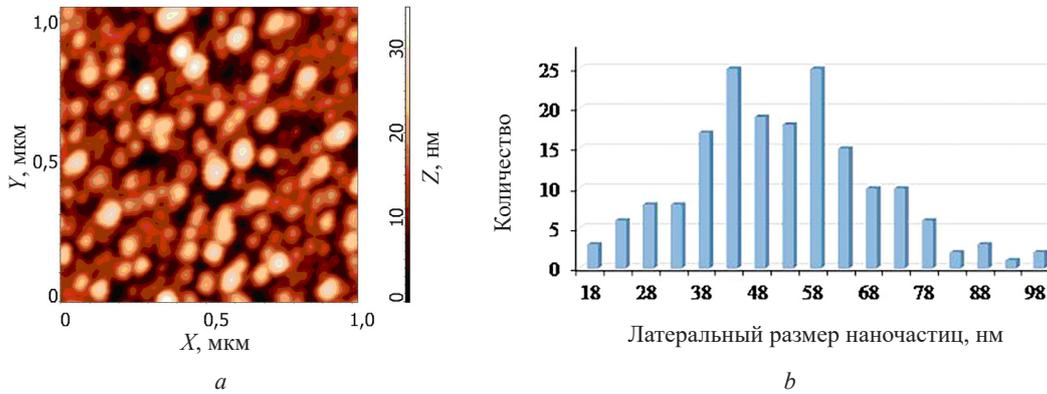


Рис. 4. 2D-изображение рельефа поверхности (a) пленки серебра, отожженной при температуре 195 °С, и гистограмма распределения в ней наночастиц по размерам (b)

Fig. 4. 2D image of the surface relief (a) of a silver film annealed at temperature of 195 °C, and histogram of the size distribution of nanoparticles in it (b)

(диаметр) частиц в ней составляют  $d \sim 10$  нм. При этом частицы плотно упакованы в монослой. Параметр перекрытия  $\eta$ , равный отношению поверхности подложки, занятой частицами, к общей площади подложки, составляет  $\sim 0,7$ . Неоднородность рельефа поверхности пленки не превышает 6 нм, что меньше средних латеральных размеров частиц. Отжиг при температуре 145 °С приводит к увеличению средних латеральных размеров частиц в образцах до  $d \sim 35\text{--}40$  нм (рис. 3). Поскольку количество металла остается таким же, как и в исходном образце, а в процессе отжига увеличивается размер наночастиц и в вертикальном направлении, происходит уменьшение параметра перекрытия по сравнению с исходным образцом ( $\eta \sim 0,6$ ). Отжиг пленки серебра при более высокой температуре 195 °С обуславливает дальнейшее укрупнение средних размеров частиц до  $d \sim 45\text{--}60$  нм (рис. 4) и уменьшение параметра перекрытия.

Проведение отжига оказывает сильное влияние на спектральные и морфологические характеристики исследованных пленок серебра. Как показано выше, в процессе отжига достигается увеличение средних размеров частиц в монослой, а также происходит существенный коротковолновый спектральный сдвиг максимума полосы ПППП отожженной пленки относительно максимума исходной. Поскольку известно, что увеличение размера наночастицы обычно сопровождается сдвигом максимума полосы ПППП в длинноволновую область спектра [22], может показаться, что наблюдаемые эффекты противоречат друг другу. Однако, поскольку размер наночастиц является лишь одним из факторов, оказывающих влияние на спектральное поло-

жение полосы ППРП в рассматриваемых монослоях, противоречий на самом деле здесь нет. Важно обратить внимание на то, что анализируемые монослои являются плотноупакованными. Такие системы характеризуются наличием сильных электродинамических взаимодействий между наночастицами [2, 23], приводящих к длинноволновому сдвигу полосы ППРП относительно локализованного ППРП, проявляющегося для одной частицы такого же размера. В [24] с использованием квазикристаллического приближения теории многократного рассеяния волн проведены расчеты спектральных характеристик плотноупакованных монослоев наночастиц серебра разного диаметра для различных значений параметра перекрытия. Показано, что для монослоя наночастиц серебра диаметром 10 нм, расположенного в матрице с показателем преломления  $n = 1,5$ , изменение параметра перекрытия от  $\eta = 0,001$  (соответствует отсутствию взаимодействий между наночастицами) до  $\eta = 0,7$  (соответствует сильным латеральным взаимодействиям) приводит к длинноволновому спектральному сдвигу максимума полосы ППРП на 131 нм (от 415 до 546 нм). В то же время увеличение от 10 до 40 нм среднего размера отдельной наночастицы серебра, расположенной в матрице с показателем преломления  $n = 1,5$ , приводит к длинноволновому сдвигу максимума полосы ППРП всего на  $\sim 25$  нм (от 415 до 438 нм). Даже для монослоев наночастиц серебра диаметром 40–50 нм, характеризующихся параметрами перекрытия  $\eta$ , превышающими параметры перекрытия в исследованных отожженных пленках, расчетный максимум полосы ППРП располагается на меньших длинах волн по сравнению с монослоем серебра со средним размером наночастиц 10 нм и параметром перекрытия  $\eta = 0,7$  [24].

Таким образом, наблюдаемый для исследованных образцов коротковолновый спектральный сдвиг максимума полосы ППРП отожженной пленки серебра относительно максимума исходной пленки можно объяснить суммарным действием двух основных факторов – изменением размеров наночастиц и изменением степени проявления латеральных электродинамических взаимодействий между металлическими наночастицами. Действие других факторов, таких, например, как оксидные включения в наночастицах серебра, оказывает малое влияние на спектральное положение полосы ППРП. Согласно [25] поглощение оксида серебра  $\text{Ag}_2\text{O}$  является неселективным в видимом диапазоне, а величина поглощения  $\text{AgO}$  в спектральной области 420–525 нм различается в пределах не более 10–11 % [26], поэтому окислительные процессы могут оказывать заметное влияние не на спектральное положение полосы ППРП, а на ее интенсивность.

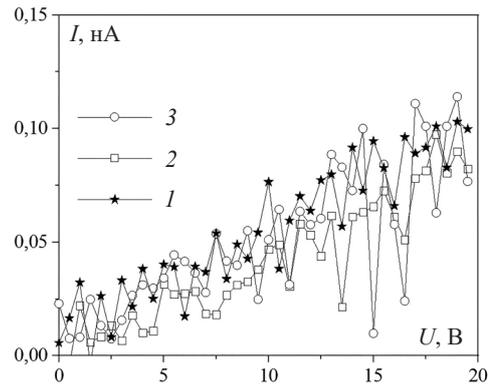
Следует отметить, что имеются небольшие различия длин волн максимумов полос ППРП в экспериментальных спектрах и в рассчитанных [24]. Так, в исходных гранулированных пленках серебра со средним диаметром наночастиц  $\sim 10$  нм максимум полосы ППРП расположен на длине волны  $\lambda \approx 525$  нм, а в рассчитанных – на 546 нм. Данные различия могут быть связаны с тем, что в расчетах предполагается, что сферические наночастицы серебра расположены в матрице с показателем преломления  $n = 1,5$ , а на эксперименте наночастицы серебра расположены на стеклянной подложке (показатель преломления которой близок к 1,5) и граничат с воздухом. К тому же в экспериментальных образцах форма наночастиц отличается от сферической.

На рис. 5 показаны продольные ВАХ исходной (кривая 1) и отожженных при температурах 145 и 195 °С пленок серебра (кривые 2 и 3 соответственно). Из рисунка видно, что для всех образцов повышение напряжения приводит к увеличению величины тока. При этом наблюдаются значительные скачки значений тока, которые в меньшей степени выражены для исходного образца и усиливаются для отожженных образцов. Наблюдаемый вид ВАХ может быть обусловлен тем, что уже для исходной структуры на воздухе начинают проявляться процессы окисления, способствующие образованию тонких оксидных оболочек на наночастицах серебра, усиливающих изолированность металлических наночастиц друг от друга в гранулированной пленке. В процессе отжига могут формироваться неоднородные частицы большего размера, содержащие в своем составе объемные оксидные включения. Укрупнение частиц может сопровождаться их кластеризацией, которая приводит к увеличению числа межзеренных границ.

Таким образом, в нашем случае имеет место конкуренция перечисленных факторов, приводящая к увеличению флуктуаций тока. Эти же процессы могут быть ответственны и за низкую проводимость пленок. Как видно из рис. 5, все исследованные пленки являются высокоомными, что согласуется с результатами других работ, где при малых скоростях осаждения получены гранулированные пленки серебра [13, 27].

Рис. 5. Вольт-амперные характеристики пленок серебра: 1 – исходной; 2 и 3 – после отжига при температуре 145 и 195 °C соответственно

Fig. 5. Current-voltage characteristics of silver films: 1 – initial; 2 and 3 – after annealing at temperatures of 145 and 195 °C, respectively



Также были проведены измерения фотопроводимости исходных и отожженных пленок Ag в зависимости от длины волны облучения. В качестве источников излучения использовались светодиоды с различными длинами волн видимого и ближнего ИК-диапазонов. Как видно из рис. 6, при малых отрицательных значениях напряжения ( $-0,25$  В) величина тока в исходной пленке серебра существенно зависит от длины волны излучения. Так, при воздействии на пленку излучением с  $\lambda = 808$  нм ток уменьшается на порядок по сравнению с его темновым значением, в то время как при  $\lambda = 980$  нм величина тока на порядок увеличивается. Таким образом, диапазон изменения величины тока в пленке составляет 2 порядка.

Для отожженной при температуре 145 °C пленки в области малых отрицательных напряжений величина тока также сложным образом зависит от длины волны облучения и величины подаваемого напряжения. Как видно из рис. 7, при величине напряжения  $-0,5$  В облучение пленки излучением с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм (или  $\lambda = 980$  нм) приводит к некоторому увеличению тока относительно его темнового значения, а при действии излучения с длиной волны  $\lambda = 405$  нм – к существенному уменьшению. При этом, как при подаче меньшего отрицательного напряжения ( $-0,25$  В), так и большего ( $-0,75$  В), величина тока при воздействии на пленку излучения с длиной волны  $\lambda = 405$  нм несколько превышает его темновое значение. Можно отметить, что излучение с длиной волны  $\lambda = 405$  нм попадает в область, близкую к максимуму полосы ППРП пленки серебра, отожженной при температуре 145 °C (см. рис. 1, кривая 2). Как правило, воздействие на гранулированную металлическую пленку излучения такого спектрального диапазона

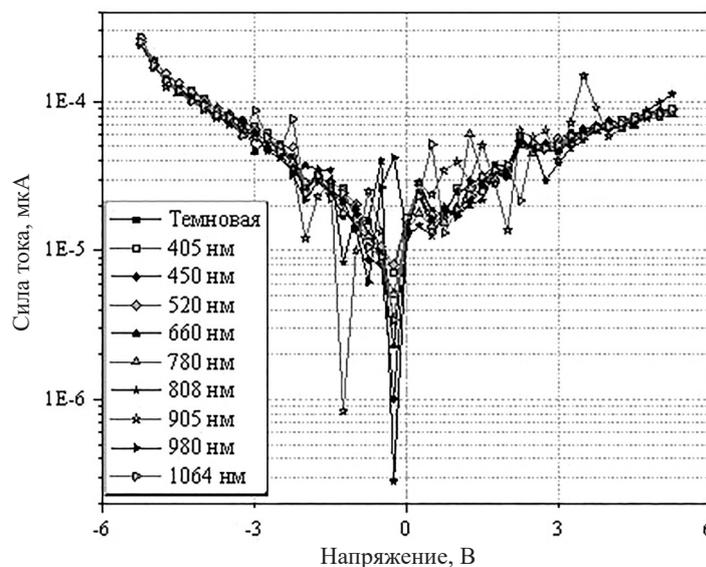


Рис. 6. Влияние излучения разной длины волны на вольт-амперную характеристику исходной пленки серебра

Fig. 6. Effect of radiation of different wavelengths on the current-voltage characteristics of the original silver film

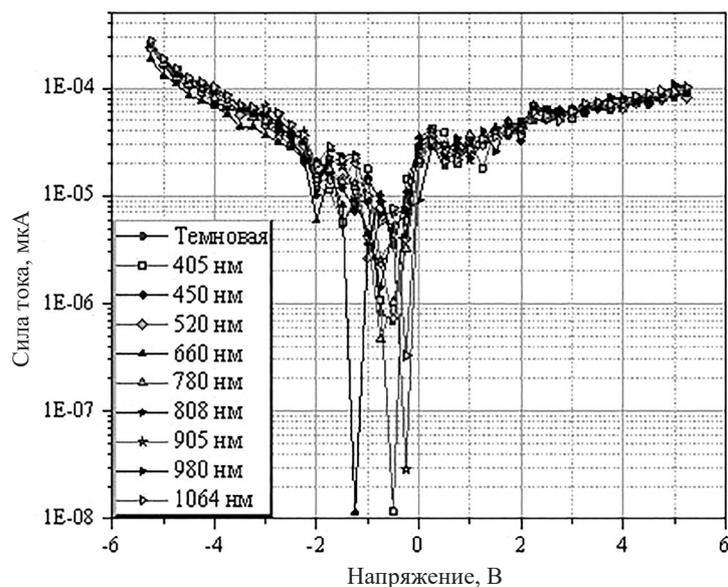


Рис. 7. Влияние излучения разной длины волны на вольт-амперную характеристику отожженной при температуре 145 °С пленки серебра

Fig. 7. Effect of radiation of different wavelengths on the current-voltage characteristics of a silver film annealed at temperature of 145 °C

способствует увеличению ее проводимости [28]. В рассматриваемом случае металлические наночастицы достаточно удалены друг от друга и, вероятно, содержат ряд дефектов в виде дислокаций, границ зерен, оксидных оболочек и включений. Расположенная на стеклянной подложке гранулированная пленка серебра вместе с приповерхностным слоем подложки может рассматриваться как неупорядоченный полупроводник [29–31], в котором вместо запрещенной зоны имеется энергетическая щель подвижности, характеризующаяся наличием достаточно высокой плотности состояний. Можно предположить, что наблюдаемое для напряжения  $-0,5$  В уменьшение проводимости отожженной пленки серебра при воздействии излучения, попадающего в полосу ПППП металлических наночастиц, вызвано тем, что дефекты, которые содержатся в приповерхностном слое стеклянной подложки и в плазмонных наночастицах, проявляют себя не только как ловушки для электронов, обеспечивающие проводимость в образце путем прыжкового механизма, но и как центры рекомбинации, уменьшающие количество свободных носителей заряда. Наблюдающаяся на эксперименте при малых значениях подаваемого на исследуемый образец напряжения зависимость фотопроводимости от длины волны воздействующего излучения отражает особенности проявления электронно-фотонных и электронно-фононных взаимодействий в системах «островковая пленка – стеклянная подложка», где имеется большое количество объемных и поверхностных ловушек.

**Заключение.** Установлено, что отжиг даже при относительно небольших температурах (до 200 °C) позволяет существенно влиять на спектральные и морфологические характеристики наноструктур серебра. Показано, что все исследованные образцы, как исходные, так и подвергнутые отжигу, являются высокоомными. Как для исходной гранулированной пленки Ag, так и для пленки, отожженной при температуре 145 °C, в области малых значений подаваемого напряжения прослеживается сложная немонотонная зависимость тока от длины волны облучения и подаваемого напряжения с изменениями величины тока в диапазоне до двух порядков.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Вьетнамской академии наук и технологий (проекты № Ф23В-007 и № QTBY01.09/23-24).

**Acknowledgments.** The work was sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research and the Vietnam Academy of Science and Technology (projects no. Ф23В-007 and no. QTBY01.09/23-24).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
2. Kreibig, U. Optical Properties of Metal Clusters / U. Kreibig, M. Volmer. – Berlin: Springer, 1995. – 533 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09109-8>
3. Maier, S. A. Plasmonics: Fundamentals and Applications / S. A. Maier. – New York: Springer, 2007. – 224 p. <https://doi.org/10.1007/0-387-37825-1>
4. Климов, В. В. Наноплазмоника / В. В. Климов. – М.: Физматлит, 2009. – 480 с.
5. Morris, J. E. Resistance changes of discontinuous gold films in air / J. E. Morris // *Thin Solid Films*. – 1970. – Vol. 5, № 5–6. – P. 339–353. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(70\)90106-9](https://doi.org/10.1016/0040-6090(70)90106-9)
6. Thurstans, R. E. The electroformed metal-insulator-metal structure: a comprehensive model / R. E. Thurstans, D. P. Oxley // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2002. – Vol. 35, № 8. – P. 802–809. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/35/8/312>
7. A hydrogen sensor based on tunneling between palladium clusters / J. Lith [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – Vol. 91, № 18. – Art. ID 181910 (3 p.). <https://doi.org/10.1063/1.2802730>
8. Introductory Lecture: Surface enhanced Raman spectroscopy: new materials, concepts, characterization tools, and applications / J. A. Dieringer [et al.] // *Faraday Discuss.* – 2006. – Vol. 132. – P. 9–26. <https://doi.org/10.1039/b513431p>
9. Stuart, H. R. Island size effects in nanoparticle-enhanced photodetectors / H. R. Stuart, D. G. Hall // *Appl. Phys. Lett.* – 1998. – Vol. 73, № 26. – P. 3815–3817. <https://doi.org/10.1063/1.122903>
10. Atwater, H. A. Plasmonics for improved photovoltaic devices / H. A. Atwater, A. Polman // *Nat. Mater.* – 2010. – Vol. 9. – P. 205–213. <https://doi.org/10.1038/nmat2629>
11. Чопра, Н. Л. Электрические явления в тонких пленках / Н. Л. Чопра. – М.: Мир, 1972. – 434 с.
12. Neugebauer, C. A. Electrical conduction mechanism in ultrathin, evaporated metal films / C. A. Neugebauer, M. N. Web // *J. Appl. Phys.* – 1962. – Vol. 33, № 1. – P. 74–82. <https://doi.org/10.1063/1.1728531>
13. Wei, H. From silver nanoparticles to thin films: Evolution of microstructure and electrical conduction on glass substrates / H. Wei, H. Eilers // *J. Phys. Chem. Solids*. – 2009. – Vol. 70, № 2. – P. 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2008.11.012>
14. Sieradzki, K. Agglomeration and percolation conductivity / K. Sieradzki, K. Bailey, T. L. Alford // *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 79, № 21. – P. 3401–3403. <https://doi.org/10.1063/1.1419043>
15. Electromagnetic energy transport via linear chains of silver nanoparticles / M. Quinten [et al.] // *Opt. Lett.* – 1998. – Vol. 23, № 17. – P. 1331. <https://doi.org/10.1364/ol.23.001331>
16. Araki, H. The temperature dependence of electron emission from a discontinuous carbon film device between silver film electrodes / H. Araki, T. Hanawa // *Thin Solid Films*. – 1988. – Vol. 158, № 2. – P. 207–216. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(88\)90022-3](https://doi.org/10.1016/0040-6090(88)90022-3)
17. Xu, N. S. Novel cold cathode materials and applications / N. S. Xu, S. Ejaz Huq // *Mater. Sci. Eng.: R: Rep.* – 2005. – Vol. 48, № 2–3. – P. 47–189. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.12.001>
18. Fedorovich, R. D. Electronic phenomena in nanodispersed thin films / R. D. Fedorovich, A. G. Naumovets, P. M. Tomchuk // *J. Phys.: Condens. Matter*. – 1999. – Vol. 11, № 49. – P. 9955–9967. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/11/49/313>
19. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В. Л. Миронов. – М.: Техносфера, 2004. – 144 с.
20. Автоматизированный базовый лазерный испытательный комплекс для тестирования перспективных видов полупроводниковых фотоприемников / В. Б. Залесский [и др.] // *Приборостроение-2020: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф.* – Минск, 2020. – С. 391–392.
21. Metal cluster enhanced organic solar cells / M. Westphalen [et al.] // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. – 2000. – Vol. 61, № 1. – P. 97–105. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(99\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(99)00100-2)
22. Bohren, C. Absorption and Scattering of Light by Small Particles / C. Bohren, D. Huffman. – New York: Wiley, 1983. – 530 p. <https://doi.org/10.1002/9783527618156>
23. Замковец, А. Д. Высокий сенсорный потенциал самоорганизующихся металлических наноструктур / А. Д. Замковец, С. М. Качан, А. Н. Понявина // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. – 2008. – № 4. – С. 73–79.
24. Kachan, S. M. Optical diagnostics of 2D self-assembled silver nanoparticles arrays / S. M. Kachan, A. N. Ponyavina // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. – 2007. – P. 165–168. [https://doi.org/10.1142/9789812770950\\_0036](https://doi.org/10.1142/9789812770950_0036)
25. Suresh, S. Synthesis, Structural, Surface Morphology, Optical and Electrical Properties of Silver Oxide Nanoparticles / S. Suresh // *Int. J. Nanoelectron. Mater.* – 2016. – Vol. 9. – P. 37–49.
26. Characterization of silver oxide thin films with thickness variation prepared by thermal evaporation method / F. A. Jasim [et al.] // *Dig. J. Nanomater. Biostructures*. – 2023. – Vol. 18, № 13. – P. 1039–1049. <https://doi.org/10.15251/djnb.2023.183.1039>
27. Оптические и электрические свойства и переключение сопротивления гранулированных пленок серебра на сапфире / И. А. Гладских [и др.] // *Опт. журн.* – 2014. – Т. 81, № 5. – С. 67–73.
28. Vashchenko, E. V. Photoconductivity of silver nanoparticle ensembles on quartz glass (SiO<sub>2</sub>) supports assisted by localized surface plasmon excitations / E. V. Vashchenko, T. A. Vartanyan, F. Hubenthal // *Plasmonics*. – 2013. – Vol. 8. – P. 1265–1271. <https://doi.org/10.1007/s11468-013-9544-8>
29. Даревский, А. С. Описание механизма переноса в островковых пленках металлов в рамках представлений теории протекания / А. С. Даревский, А. Г. Ждан, В. Н. Неменуций // *Диспергированные металлические пленки*. – Киев, Изд.-во АН УССР, 1976. – С. 155–163.
30. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах: пер. с англ. / Н. Мотт, Э. Дэвис. – М.: Мир, 1974. – 472 с.
31. Проводимость и фотопроводимость гранулированной пленки серебра на сапфировой подложке / Е. В. Ващенко [и др.] // *Опт. журн.* – 2013. – Т. 80, № 5. – С. 3–10.

## References

1. Gusev A. I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnology*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 416 p. (in Russian).
2. Kreibig U., Volmer M. *Optical Properties of Metal Clusters*. Berlin, Springer, 1995. 533 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09109-8>
3. Maier S. A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. New York, Springer, 2007. 224 p. <https://doi.org/10.1007/0-387-37825-1>
4. Klimov V. V. *Nanoplasmonics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 480 p. (in Russian).
5. Morris J. E. Resistance changes of discontinuous gold films in air. *Thin Solid Films*, 1970, vol. 5, no. 5–6, pp. 339–353. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(70\)90106-9](https://doi.org/10.1016/0040-6090(70)90106-9)
6. Thurstans R. E., Oxley D. P. The electroformed metal-insulator-metal structure: a comprehensive model. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, vol. 35, no. 8, pp. 802–809. [10.1088/0022-3727/35/8/312](https://doi.org/10.1088/0022-3727/35/8/312)
7. Lith J., Lassesson A., Brown S. A., Schulze M., Partridge J. G., Ayesh A. A hydrogen sensor based on tunneling between palladium clusters. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91, no. 18, art. ID 181910 (3 p.). <https://doi.org/10.1063/1.2802730>
8. Dieringer J. A., McFarland A. D., Shah N. C., Stuart D. A., Whitney A. V., Yonzon C. R., Young M. A., Zhang X., Van Duyne R. P. Introductory Lecture: Surface enhanced Raman spectroscopy: new materials, concepts, characterization tools, and applications. *Faraday Discuss*, 2006, vol. 132, pp. 9–26. <https://doi.org/10.1039/b513431p>
9. Stuart H. R., Hall D. G. Island size effects in nanoparticle-enhanced photodetectors. *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 73, no. 26, pp. 3815–3817. <https://doi.org/10.1063/1.122903>
10. Atwater H. A., Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices. *Nature Materials*, 2010, vol. 9, pp. 205–213. <https://doi.org/10.1038/nmat2629>
11. Chopra K. L. *Thin Film Phenomena*. McGraw-Hill, 1969. 844 p.
12. Neugebauer C. A., Web M. N. Electrical conduction mechanism in ultrathin evaporated metal films. *Journal of Applied Physics*, 1962, vol. 33, no. 1, pp. 74–82. <https://doi.org/10.1063/1.1728531>
13. Wei H., Eilers H. From silver nanoparticles to thin films: Evolution of microstructure and electrical conduction on glass substrates. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2009, vol. 70, no. 2, pp. 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2008.11.012>
14. Sieradzki K., Bailey K., Alford T. L. Agglomeration and percolation conductivity. *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 79, no. 21, pp. 3401–3403. <https://doi.org/10.1063/1.1419043>
15. Quinten M., Leitner A., Krenn J. R., Aussenegg F. R. Electromagnetic energy transport via linear chains of silver nanoparticles. *Optics Letters*, 1998, vol. 23, no. 17, pp. 1331–1333. <https://doi.org/10.1364/ol.23.001331>
16. Araki H., Hanawa T. The temperature dependence of electron emission from a discontinuous carbon film device between silver film electrodes. *Thin Solid Films*, 1988, vol. 158, no. 2, pp. 207–216. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(88\)90022-3](https://doi.org/10.1016/0040-6090(88)90022-3)
17. Xu N. S., Huq S. Ejaz. Novel cold cathode materials and applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005, vol. 48, no. 2–3, pp. 47–189. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.12.001>
18. Fedorovich R. D., Naumovets A. G., Tomchuk P. M. Electronic phenomena in nanodispersed thin films. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1999, vol. 11, no. 49, pp. 9955–9967. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/11/49/313>
19. Mironov V. L. *Fundamentals of Scanning Probe Microscopy*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 144 p. (in Russian).
20. Zalessky V. B., Malyutina-Bronskaya V. V., Soroka S. A., Ermakov O. V., Grebenshchikov O. A., Leonova T. R. Automated basic laser testing complex for testing promising types of semiconductor photodetectors. *Priboroostroenie-2020: materialy 13-i Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* [Instrumentation-2020: materials of the 13<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 2020, pp. 391–392 (in Russian).
21. Westphalen M., Kreibig U., Rostalski J., Lüth H., Meissner D. Metal cluster enhanced organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, vol. 61, no. 1, pp. 97–105. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(99\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(99)00100-2)
22. Bohren C., Huffman D. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York, Wiley, 1983. 530 p. <https://doi.org/10.1002/9783527618156>
23. Zamkovets A. D., Kachan S. M., Ponyavina A. N. High sensory potential of self-organizing metal nanostructures. *Sensorna elektronika i mikrosistemni tekhnologii = Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2008, no. 4, pp. 74–79 (in Russian).
24. Kachan S. M., Ponyavina A. N. Optical diagnostics of 2D self-assembled silver nanoparticles arrays. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*, 2007, pp. 165–168. [https://doi.org/10.1142/9789812770950\\_0036](https://doi.org/10.1142/9789812770950_0036)
25. Suresh S. Synthesis, Structural, Surface Morphology, Optical and Electrical Properties of Silver Oxide Nanoparticles. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, 2016, vol. 9, pp. 37–49.
26. Jasima F. A., Mosa Z. S. A., Habubi N. F., Kadhimi Y. H., Chiad S. S. Characterization of silver oxide thin films with thickness variation prepared by thermal evaporation method. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2023, vol. 18, no. 13, pp. 1039–1049. <https://doi.org/10.15251/djnb.2023.183.1039>
27. Gladskikh I. A., Leonov N. B., Przhibel'sky S. G., Vartanyan T. A. The optical and electrical properties and resistance switching of granular films of silver on sapphire. *Journal of Optical Technology*, 2014, vol. 81, no. 5, pp. 280–284. <https://doi.org/10.1364/jot.81.000280>
28. Vashchenko E. V., Vartanyan T. A., Hubenthal F. Photoconductivity of silver nanoparticle ensembles on quartz glass (SiO<sub>2</sub>) supports assisted by localized surface plasmon excitations. *Plasmonics*, 2013, vol. 8, pp. 1265–1271. <https://doi.org/10.1007/s11468-013-9544-8>

29. Darevsky A. S., Zhdan A. G., Nemenushchiy V. N. Description of the transport mechanism in island films of metals within the framework of the concepts of percolation theory. *Dispersed Metal Films*. Kyiv, Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1976, pp. 155–163 (in Russian).

30. Mott N., Davis E. *Electronic Processes in Noncrystalline Materials*. London, Oxford University Press, 1971. xiii + 437 p.

31. Vashchenko E. V., Gladskikh I. A., Przhibel'sky S. G., Khromov V. V., Vartanyan T. A. Conductivity and photoconductivity of granular silver film on a sapphire substrate. *Journal of Optical Technology*, 2013, vol. 80, no. 5, pp. 263–268. <https://doi.org/10.1364/jot.80.000263>

### Информация об авторах

**Замковец Анатолий Дмитриевич** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник центра «Фотоника атомных и молекулярных структур», Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.zamkovets@dragon.bas-net.by

**Тихомиров Сергей Александрович** – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник центра «Фотоника атомных и молекулярных структур», Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: E-mail: s.tik@ifanbel.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, Минск, Республика Беларусь). E-mail: brlv@mail.ru

**Кузьмицкая Анна Сергеевна** – научный сотрудник лаборатории фотоэлектроники, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mickevichhanna@gmail.com

**Малютинна-Бронская Виктория Владимировна** – заведующий лабораторией фотоэлектроники, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: malyutina@oelt.basnet.by

**Фролов Игорь Юрьевич** – ведущий инженер-технолог лаборатории фотоэлектроники, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: malyutina@oelt.basnet.by

**Фам Ван Дуонг** – кандидат физико-математических наук, руководитель научной группы центра квантовой электроники, Институт физики Вьетнамской академии наук и технологий (10 Dao Tan Str., Cong Vi, Da Dinh, Hanoi, Vietnam). E-mail: pvduong@iop.vast.vn

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

### Information about the authors

**Anatoly D. Zamkovets** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Center “Photonics of Atomic and Molecular Structures”, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.zamkovets@dragon.bas-net.by

**Sergey A. Tikhomirov** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Scientific Head of the Center “Photonics of Atomic and Molecular Structures”, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.tik@ifanbel.bas-net.by

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

**Hanna S. Kuzmitskaya** – Researcher at the Photoelectronics Laboratory, SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mickevichhanna@gmail.com

**Victoriya V. Malyutina-Bronskaya** – Head of the Photoelectronics Laboratory, SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: malyutina@oelt.bas-net.by

**Igor Y. Frolov** – Leading Engineer-Technologist of the Photoelectronics Laboratory, SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: malyutina@oelt.bas-net.by

**Pham Van Duong** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Scientific Worker of Center for Quantum electronics, Institute of Physics of the Vietnam Academy of Science and Technology (10 Dao Tan Str., Cong Vi, Da Dinh, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam). E-mail: pvduong@iop.vast.vn

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