

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-9-22

УДК 538.975

Исследование влияния длины волны лазерного излучения на эффект дихроизма в пленках ZnO:Ag

Владислав Романович Греско¹✉, Максим Михайлович Сергеев²,
Артур Джуракулович Долгополов³, Лилия Александровна Сокура⁴,
Евгений Анатольевич Григорьев⁵

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

⁴ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

⁵ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

¹ gresko.97@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3308-6034>

² maxim.m.sergeev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2854-9954>

³ addolgoполов@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9548-791X>

⁴ sokuraliliy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9725-5912>

⁵ grigoryev_egeniy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0614-6695>

Аннотация

Введение. Пленки ZnO:Ag применяются в качестве фотопоглощающих слоев в плазмонных фотодетекторах. Применение лазерного излучения при изготовлении фотодетекторов позволяет управлять параметрами пика плазмонного резонанса и изменять диапазон спектральной чувствительности устройства. Известные исследования по лазерному воздействию на подобные фотопоглощающие пленки с наночастицами уделяют мало внимания эффекту дихроизма, возникающему в результате лазерного воздействия. При наличии дихроизма эффективность плазмонного фотодетектора зависит от поляризации детектируемого излучения. В работе исследован эффект дихроизма, возникающий в ZnO:Ag пленках при воздействии фемтосекундного лазерного излучения с длинами волн вблизи плазмонного резонанса наночастиц и вдали от него. **Метод.** Для получения эффекта дихроизма в пленках использовались лазерные импульсы с длиной волны вблизи плазмонного резонанса наночастиц (515 ± 5 нм) и вдали от него (1030 ± 5 нм). Применены импульсы с линейной поляризацией длительностью 224 ± 15 фс и частотой следования 200 кГц. Спектры пропускания линейно-поляризованного света с областями пленок ZnO:Ag, модифицированных лазерным излучением, получены с помощью микроскопа-спектрофотометра. Размер, концентрация, форма и расположение наночастиц в пленках, морфология поверхности пленок оксида цинка (ZnO) исследовались методами электронной микроскопии. **Основные результаты.** Показано, что лазерное излучение с длиной волны вблизи плазмонного резонанса наночастиц с плотностью энергии в импульсе выше $43 \pm 0,5$ мДж/см², приводит к появлению в пленках эффекта дихроизма. Возникновение этого эффекта связано с переориентацией наночастиц. Лазерное воздействие приводит к переориентации исходного хаотичного расположения наночастиц в направлении, параллельное вектору поляризации лазерного излучения. Наибольшее значение величины линейного дихроизма достигается в области длин волн плазмонного резонанса 515 ± 5 нм при плотности энергии излучения $66 \pm 0,5$ мДж/см². Дальнейшее увеличение плотности энергии приводит к уменьшению дихроизма за счет возвращения хаотической ориентации. Воздействие излучения с длиной волны вдали от плазмонного резонанса 1030 ± 5 нм с эквивалентными плотностями энергии не приводит к переориентации наночастиц и, как следствие, изменение величины линейного дихроизма оказывается значительно ниже. **Обсуждение.** Согласно предложенной гипотезе отличия между результатами лазерного воздействия могут быть связаны с различными механизмами поглощения излучения в материале. Излучение с длиной волны 515 ± 5 нм поглощается наночастицами. В случае линейной поляризации излучения происходит ионизация наночастиц и их переориентация параллельно вектору поляризации. На длине волны 1030 ± 5 нм излучение поглощается матрицей ZnO. Это приводит к нагреву пленки, передаче тепла к наночастицам, в результате процесс переориентации наночастиц параллельно вектору поляризации затрудняется, а эффект дихроизма проявляется значительно меньше. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при проектировании и изготовлении фотодетекторов за счет выявленной возможности смещать пик плазмонного резонанса наночастиц в фотопоглощающем слое фотодетектора. Управление эффектом дихроизма позволяет управлять диапазоном чувствительности детекторов.

© Греско В.Р., Сергеев М.М., Долгополов А.Д., Сокура Л.А., Григорьев Е.А., 2025

Ключевые слова

фемтосекундные лазерные импульсы, дихроизм, золь-гель пленки, пленки оксида цинка, наночастицы серебра, плазмонный резонанс, лазерная модификация

Благодарности

Исследования финансировались за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00180).

Исследование структуры методом СЭМ-электронной микроскопии было проведено в Центре нанотехнологий Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта № 118201839.

Ссылка для цитирования: Греско В.Р., Сергеев М.М., Долгополов А.Д., Сокура Л.А., Григорьев Е.А. Исследование влияния длины волны лазерного излучения на эффект дихроизма в пленках ZnO:Ag // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 9–22. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-9-22

Study of the influence of laser wavelength on the dichroism effect in ZnO:Ag films

Vladislav R. Gresko¹, Maksim M. Sergeev², Arthur D. Dolgoplov³, Liliia A. Sokura⁴,
Evgeniy A. Grigoryev⁵

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

⁴ Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

⁵ St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

¹ gresko.97@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3308-6034>

² maxim.m.sergeev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2854-9954>

³ addolgoplov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9548-791X>

⁴ sokuraliliy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9725-5912>

⁵ grigoryev_egeniy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0614-6695>

Abstract

ZnO:Ag films are used as photoabsorbing layers in plasmonic photodetectors. The use of laser radiation in the manufacture of photodetectors allows one to control the parameters of the plasmon resonance peak and change the range of spectral sensitivity of the device. Known studies on laser action on similar photoabsorbing films with nanoparticles pay little attention to the dichroism effect arising as a result of laser action. In the presence of dichroism, the efficiency of a plasmonic photodetector depends on the polarization of the detected radiation. The aim of this work is to study the dichroism effect arising in ZnO:Ag films under the action of femtosecond laser radiation with wavelengths near the plasmon resonance of nanoparticles and far from it. To obtain the dichroism effect in the films, laser pulses with a wavelength near the plasmon resonance of nanoparticles (515 ± 5 nm) and far from it (1030 ± 5 nm) were used. Linearly polarized pulses of 224 ± 15 fs duration and 200 kHz repetition rate were used. Transmission spectra of linearly polarized light by areas of ZnO:Ag films modified by laser radiation were obtained using a spectrophotometer microscope. The size, concentration, shape and arrangement of nanoparticles in the films, and the surface morphology of zinc oxide (ZnO) films were studied using electron microscopy methods. It was shown that laser radiation with a wavelength near the plasmon resonance of nanoparticles with an energy density in a pulse higher than 43 ± 0.5 mJ/cm² leads to the appearance of a dichroism effect in the films. The occurrence of this effect is associated with the reorientation of nanoparticles. Laser action leads to a reorientation of the initially chaotic arrangement of nanoparticles in the direction parallel to the polarization vector of the laser radiation. The highest value of the linear dichroism is achieved in the region of plasmon resonance wavelengths of 515 ± 5 nm at a radiation energy density of 66 ± 0.5 mJ/cm². A further increase in the energy density leads to a decrease in dichroism due to the return of chaotic orientation. The effect of radiation with a wavelength far from the plasmon resonance of 1030 ± 5 nm with equivalent energy densities does not lead to a reorientation of nanoparticles and, as a consequence, the change in the linear dichroism value is significantly lower. According to the proposed hypothesis, the differences between the results of laser exposure are associated with different mechanisms of radiation absorption in the material. Radiation with a wavelength of 515 ± 5 nm is absorbed by nanoparticles. In the case of linear polarization of radiation, ionization of nanoparticles and their reorientation parallel to the polarization vector occur. At a wavelength of 1030 ± 5 nm, radiation is absorbed by the ZnO matrix. This leads to heating of the film, heat transfer to the nanoparticles, as a result of which the process of reorientation of nanoparticles parallel to the polarization vector is complicated, and the dichroism effect is much less pronounced. The results of the study can be used in the design and manufacture of photodetectors due to the identified possibility of shifting the peak of plasmon resonance of nanoparticles in the photoabsorbing layer of the photodetector. Control of the dichroism effect allows controlling the sensitivity range of detectors.

Keywords

femtosecond laser pulses, dichroism, sol-gel films, zinc oxide films, silver nanoparticles, plasmon resonance, laser modification

Acknowledgements

This work was funding supported by the Russian Science Foundation (24-29-00180).

The investigation of the structure by means of scanning electron microscopy was carried out at the IRC for Nanotechnology of the Science Park of St. Petersburg State University within the framework of project No. 118201839.

For citation: Gresko V.R., Sergeev M.M., Dolgoplov A.D., Sokura L.A., Grigoryev E.A. Study of the influence of laser wavelength on the dichroism effect in ZnO:Ag films. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 9–22 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-9-22

Введение

Полупроводниковые пленки оксида цинка (ZnO) с наночастицами (НЧ) благородных (Ag, Au, Cu) и других металлов широко применяются в качестве фотопоглощающих слоев в плазмонных фотодетекторах [1]. Наличие НЧ в фоточувствительных материалах влияет на рост поглощения в определенных диапазонах оптического спектра [2], а также способствует улучшению электронного транспорта в полупроводниках [3]. Лазерное воздействие на оптически прозрачные пленки с НЧ позволяет быстро и локально изменять как плазмонные свойства НЧ, так и свойства самой матрицы, что является основой для коррекции фоточувствительности будущих детекторов [4]. Важным для успешной модификации структуры и свойств пленок с НЧ при лазерном воздействии является выбор длины волны излучения. Например, воздействие лазерным излучением с длинами волн 355 нм и 266 нм при плотности энергии выше 100 мДж/см² приводит к значительному улучшению кристалличности пленок ZnO, так как эти длины волн находятся в области собственного поглощения материала. В то же время воздействие с длинами волн 532 нм и 1064 нм оказывает гораздо меньший эффект [5]. Наличие НЧ в полупроводниковой пленке, прозрачной в оптически видимом спектре, приводит к появлению пика поглощения в окне прозрачности матрицы пленки, что характерно для плазмонного резонанса НЧ. Лазерное воздействие с длиной волны, близкой к плазмонному резонансу НЧ, также способно оказывать значительное влияние на оптические и морфологические свойства подобных полупроводниковых пленок с металлическими НЧ [6, 7]. В этом случае поглощение излучения происходит непосредственно на НЧ, которые затем передают тепло в окружающую полупроводниковую матрицу. При этом влияние лазерного излучения на анизотропию свойств НЧ в полупроводниковых пленках практически не исследовалось. Известно, что лазерно-индуцированная анизотропия формы НЧ в стеклянной матрице является причиной возникновения дихроизма [8, 9]. Такой эффект присутствует в случае воздействия фемтосекундных лазерных импульсов на серебряные НЧ в силикатной матрице. Наличие дихроизма в светопоглощающем слое фотодетектора приводит к зависимости его оптических и электрических характеристик от ориентации вектора поляризации регистрируемого излучения. Такую особенность требуется учитывать в процессе изготовления фотодетекторов.

Таким образом, для эффективного использования лазерного излучения при создании фотодетекторов важной задачей является определение условий облучения, при которых возникает дихроизм. В работе [10] обнаружено, что для возникновения дихроизма в ZnO пленках с НЧ серебра требовалось использование фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны, близкой к пику плазмонного резонанса образца. В результате воздействия лазерными импульсами с линейной поляризацией излучения и плотностью энергии $(31\text{--}131) \pm 0,5$ мДж/см² у пленок возникал эффект дихроизма, который связан с появлением анизотропии

формы НЧ. Однако не исследовалось возникновение дихроизма при лазерном воздействии линейно-поляризованного излучения с длиной волны, расположенной вдали от пика плазмонного резонанса.

Целью настоящего исследования стало определение влияния длины волны фемтосекундных лазерных импульсов с линейной поляризацией излучения на эффект дихроизма в золь-гель пленках ZnO с НЧ серебра. Для воздействия на пленки использовалось излучение с длиной волны вдали ($\lambda_1 = 1030 \pm 5$ нм) и вблизи ($\lambda_2 = 515 \pm 5$ нм) плазмонного резонанса НЧ. Предположим, что длина волны излучения λ_i находится вблизи длины волны плазмонного резонанса $\lambda_{\text{рез}}$, при условии, что разность длин волн $\Delta\lambda = |\lambda_i - \lambda_{\text{рез}}| < FWHM/2$, где FWHM (Full Width At Half Maximum) — ширина плазмонного пика на полувысоте.

Материалы и методы исследований

Лазерное воздействие на золь-гель пленки ZnO:Ag происходило на установке на базе волоконного фемтосекундного Yb-лазера ANTAUS-20W-20u (рис. 1, а) вместе с генератором гармоник. Частота следования импульсов составляла 200 кГц, длина волны излучения основной гармоники (ОГ) — 1030 ± 5 нм. Длительность импульса равна 224 ± 15 фс по уровню 0,5 от максимальной интенсивности. Излучение с фемтосекундной длительностью импульсов позволяло наиболее эффективно индуцировать процессы, приводящие к анизотропному изменению формы НЧ и к эффекту дихроизма. Это связано с высокой интенсивностью излучения, и малой тепловой диффузией в ходе воздействия [9]. С помощью асферической линзы с фокусным расстоянием $f = 8$ мм происходила фокусировка пучка на поверхность образца. Диаметр лазерного пучка по уровню $1/e$ в зоне воздействия определялся методом Лиу [11]. Перемещение образца вдоль оси oy (рис. 1, б) осуществлялось при помощи трехкоординатного стола со скоростью сканирования $v = 1$ мм/с. Плотность энергии лазерных импульсов F на поверхности образца, варьировалась в диапазоне $(18\text{--}307) \pm 0,5$ мДж/см² при воздействии излучения ОГ и $(31\text{--}131) \pm 0,5$ мДж/см² при воздействии излучения второй гармоники (ВГ). Для изучения влияния поляризации лазерного излучения, перед линзой устанавливалась фазовая полуволновая пластинка ($\lambda/2$). Вращением $\lambda/2$ пластинки линейная поляризация излучения ориентировалась вдоль направления сканирования, когда угол между вектором поляризации и направлением сканирования составлял 0° (s -поляризация на рис. 1, б), и поперек него — 90° (p -поляризация). В результате на пленках ZnO:Ag были записаны треки длиной 400 мкм с различной ориентацией линейной поляризации излучения относительно направления сканирования при разных значениях плотности энергии лазерных импульсов и длинах волн излучения.

Образцы представляли собой золь-гельные пленки ZnO:Ag, изготовленные таким же способом, как и в работе [10]. В ходе экспериментов использовались два одинаковых образца ZnO:Ag. На каждом из образцов были записаны по три серии треков. Первая серия была

записана излучением ОГ при s -поляризации, а вторая и третья серии при помощи излучения ВГ для s - и p -поляризаций. В исходных образцах НЧ располагались тонким слоем в середине пленки, их средний диаметр равнялся 40 ± 5 нм, а концентрация — $(9 \pm 1) \cdot 10^9$ см $^{-2}$. Среднее расстояние между центрами НЧ составляло 100 ± 30 нм. Спектральное пропускание $T(\lambda)$ и отражение $R(\lambda)$ естественно-поляризованного света полученной пленки ZnO:Ag в диапазоне 350–1100 нм измерялось с помощью спектрофотометра СФ-56, после чего оценивалось поглощение пленки $A(\lambda) = 1 - T(\lambda) - R(\lambda)$ (рис. 1, c). Также приведен спектр поглощения золь-гель пленки ZnO без НЧ. Длина волны плазмонного резонанса НЧ составляла $\lambda_{\text{рез}} = 540$ нм, ширина плазмонного пика на полувысоте — $FWHM = 140$ нм. Таким образом, длина волны ВГ находилась вблизи ($\Delta\lambda = 25$ нм), а ОГ ($\Delta\lambda = 490$ нм) вдали от длины волны плазмонного резонанса.

Традиционно считается, что пик плазмонного резонанса серебряных НЧ находится вблизи 400 нм [12]. Его положение зависит как от параметров НЧ (размера,

формы, материала), так и от показателя преломления окружающего материала. Увеличение показателя преломления обеспечивалось за счет термического отжига и рекристаллизации пленки. Кроме того, смещение плазмонного пика в область больших длин волн связывалось с коллективными эффектами между НЧ [13]. Толщина полученной пленки составляла $h = 120 \pm 5$ нм.

Оптическая микроскопия пленок выполнена с помощью оптического микроскопа Zeiss Axio Imager в светлом поле проходящего света в режиме линейно-поляризованного света. Морфология поверхности пленок исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Zeiss Merlin. Диаметр фотометрического участка при этом составлял 3 мм. Спектральное пропускание $T(\lambda)$ треков на пленке в диапазоне длин волн 400–800 нм и с диаметром фотометрического участка 30 мкм при нормальном падении излучения спектрофотометра регистрировалось с помощью микроскопа-спектрофотометра МСФУ-К. Спектральные характеристики измерялись по три раза в различных участках треков. Сначала усреднялись значения для

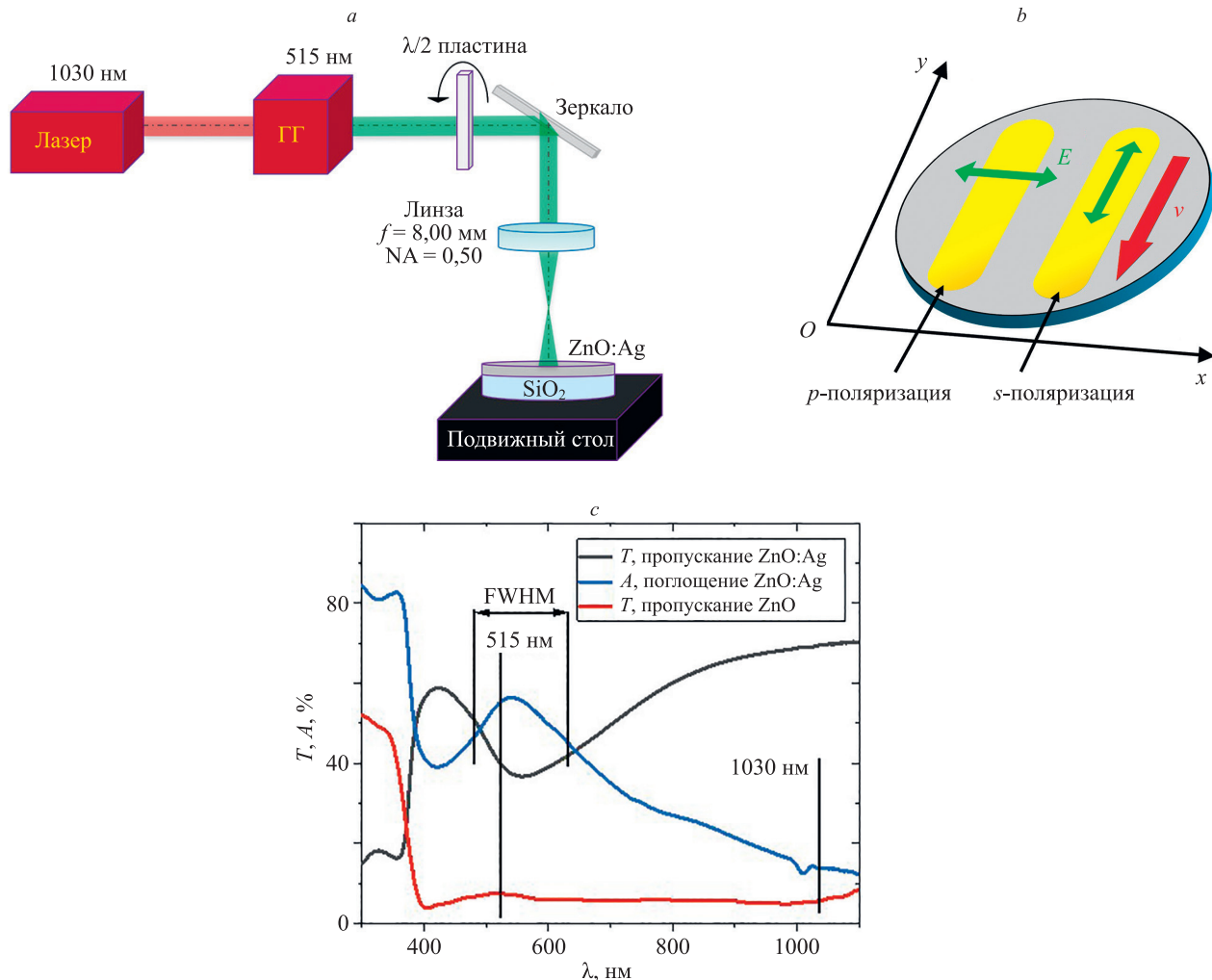


Рис. 1. Экспериментальная установка (a); ориентация вектора поляризации фемтосекундного излучения относительно направления сканирования (красная стрелка) (b); спектральные характеристики ZnO:Ag (c).

E — вектор напряженности излучения; ГГ — генератор гармоник; T — пропускание; A — поглощение; v — скорость

Fig. 1. Experimental setup (a); orientation of the polarization vector of femtosecond radiation relative to the scanning direction. The red arrow indicates the scanning direction (b); spectral characteristics of ZnO:Ag (c)

каждого из треков, затем усреднялись значения, измеренные на каждом из образцов. При исследовании треков на оптическом микроскопе в режиме поляризованного проходящего света и при измерении спектров пропускания линейно-поляризованного света поляризатор ориентировался под углами β , относительно направления сканирования. При угле $\beta = 0^\circ$, ось поляризатора была параллельна направлению сканирования, при $\beta = 90^\circ$ они были перпендикулярны.

Результаты и обсуждение

Оптическая микроскопия и спектроскопия модифицированных областей. Сформированные лазерным излучением треки на образце исследовались с помощью оптической микроскопии в линейно-поляризованном свете (рис. 2). В случае воздействия излучения ВГ (рис. 2, *a, b*) значения плотности энергии варьировались в диапазоне $(30-131) \pm 0,5$ мДж/см².

При оптической микроскопии этих областей ось поляризатора, установленного перед образцом, располагалась перпендикулярно (рис. 2, *a*) и параллельно (рис. 2, *b*) трекам. В первом случае угол между осью поляризации и направлением сканирования составлял $\beta = 90^\circ$, во втором — $\beta = 0^\circ$. При помощи оптического микроскопа была измерена RGB цветность снимков треков в проходящем свете. У трека, записанного с *s*-поляризацией при $F = 66 \pm 0,5$ мДж/см² (рис. 2, *a*) отношение интенсивности синей (I_B) компоненты к красной (I_R) в центральной части составляло $I_B/I_R = 0,74$. Интенсивность I_R была выше, чем I_B . У трека, записанного с *p*-поляризацией это отношение составило $I_B/I_R = 1,38$. При повороте треков на 90° отношение I_B/I_R для *p*-поляризации равнялось 1,32 и 0,62 для *s*-поляризации (рис. 2, *b*). Отношение I_B/I_R для исходной пленки не изменялось при повороте треков. Описанные изменения RGB цветности проходящего света при повороте образца указывало на эффект дихроизма,

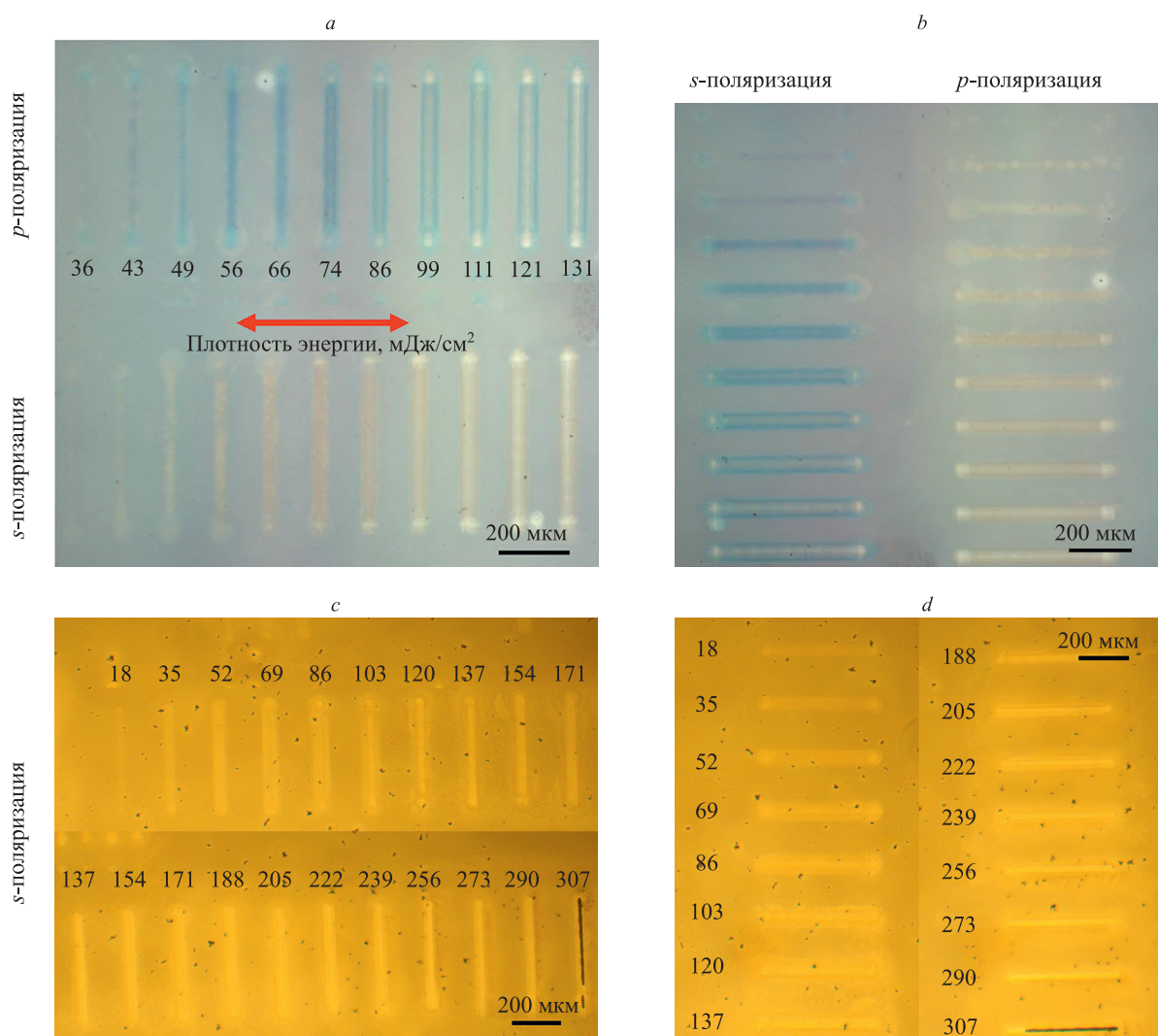


Рис. 2. Оптическая микроскопия модифицированных областей ZnO:Ag в проходящем линейно-поляризованном свете; излучения с длиной волны второй гармоники (*a, b*) и основной гармоники (*c, d*). Угол β между направлением сканирования и осью поляризации света от лампы микроскопа (красная стрелка) соответствует 90° (*a, c*) и 0° (*b, d*)

Fig. 2. Optical microscopy of modified ZnO:Ag regions in transmitted linearly polarized light; radiation with wavelength SG (*a, b*) and radiation with wavelength FG (*c, d*). The angle β between the scanning direction and the polarization axis of the light from the microscope lamp (red arrow) corresponds to 90° (*a, c*) and 0° (*b, d*)

возникающий в модифицированных областях. При плотности энергии фемтосекундных импульсов выше $74 \pm 0,5$ мДж/см² для центральной части модифицированных областей характерно исчезновение эффекта дихроизма. Это выражалось в отсутствии изменения I_B/I_R при повороте треков. В случае воздействия излучения ОГ (рис. 2, *c, d*) значения плотности энергии находились в диапазоне $(18-307) \pm 0,5$ мДж/см². При плотности энергии, меньше указанного диапазона, формирование треков не наблюдалось, превышение максимального значения в этом диапазоне приводило к абляции материала пленки. При исследовании записанных структур в поляризованном свете получено, что I_B/I_R при повороте образца изменялось незначительно. Например, для трека, записанного при $F = 52 \pm 0,5$ мДж/см², I_B/I_R менялось с 0,219 до 0,194, что указывало на значительно меньший эффект дихроизма при воздействии излучения ОГ.

Для анализа спектральных характеристик были измерены спектры пропускания $T(\lambda)$ линейно-поляризованного света, проходящего через образец. На основании измеренных спектров были рассчитаны значения оптической плотности (Optical Density, OD) ($OD(\lambda) = \lg(1/T(\lambda))$). На рис. 3 приведены спектры OD областей, записанных при помощи излучения с длиной волны 515 ± 5 нм при значениях плотности энергии $(31-131) \pm 0,5$ мДж/см². Видно, что в результате лазерного воздействия происходило смещение пика плазмонного резонанса и изменение его интенсивности. Спектральное положение этих пиков зависело, в том числе от ориентации вектора поляризации проходящего света при измерении пропускания. Максимум OD у исходной пленки составил 0,35.

В случае, если направление поляризации лазерного излучения и излучения в спектрофотометре совпадали (рис. 3, *a, d*), то увеличение плотности энергии до $49 \pm 0,5$ мДж/см² при *p*-поляризации и $56 \pm 0,5$ мДж/см² при *s*-поляризации приводило к росту OD до 0,5. Дальнейшее увеличение плотности энергии привело к уменьшению OD до 0,15–0,2 и постепенному исчезновению пика. Если направление поляризации было перпендикулярным (рис. 3, *c, d*), то интенсивность пика уменьшалась до 0,15–0,20. Также видно (рис. 3, *a, d*), что при одинаковых значениях плотности энергии, но различных поляризациях лазерного излучения отличалась интенсивность пиков плазмонного резонанса. Например, при $F = 56 \pm 0,5$ мДж/см² значения OD на рис. 3, *a, d*, составляли 0,45 и 0,53.

На основе измеренных спектров было проанализировано изменение длины волны плазмонного резонанса $\lambda_{рез}$ после воздействия излучения с различными плотностями энергии импульсов. В случае, когда направления поляризации лазерного излучения и света в спектрофотометре совпадали (красная кривая на рис. 3, *e*, и черная кривая на рис. 3, *f*), пик плазмонного резонанса перемещался в длинноволновую область спектра. Если в исходной пленке пик находился вблизи 600 нм, то после воздействия излучения ВГ с $F = 66 \pm 0,5$ мДж/см² для *s*- и *p*-поляризацией пик смещался до 700 нм и 660 нм соответственно. Дальнейшее увеличение плотности энергии приводило к смещению пика обратно к

600 нм. Если вектор поляризации лазерного излучения и вектор поляризации света в спектрофотометре были перпендикулярны (черная кривая на рис. 3, *e* и черная кривая на рис. 3, *f*), то пик перемещался в коротковолновую область спектра (до 450 нм).

Таким образом видно, что интенсивность и положение пика плазмонного резонанса отличались при различных поляризациях излучения. Причина данного различия в том, что воздействие на пленки происходило в режиме сканирования. В таком случае при различных взаимных ориентациях направления сканирования и поляризации излучения в зоне воздействия устанавливались различные градиенты температур, что приводило к различному изменению спектральных характеристик [14].

На основании спектров OD для каждой из поляризаций лазерного излучения были рассчитаны значения линейного дихроизма (Linear Dichroism, LD) $LD = OD_{90^\circ} - OD_{0^\circ}$, где OD_{90° — значения OD при угле $\beta = 90^\circ$ и OD_{0° , значения OD при угле $\beta = 0^\circ$. Аналогично были измерены спектры OD треков после воздействия излучения ОГ и рассчитан LD (рис. 4).

По полученным спектральным кривым были определены значения LD на длинах волн 500 нм (LD_{500}) и 700 нм (LD_{700}). В случае воздействия излучения ВГ (рис. 4, *a, b*) с $F = 66 \pm 0,5$ мДж/см² значения LD были следующими: $LD_{500} = 0,12$ и $LD_{700} = -0,25$ при *s*-поляризации и $LD_{500} = -0,12$ и $LD_{700} = 0,25$ при *p*-поляризации. Дальнейший рост плотности энергии приводил к уменьшению LD, форма кривой $LD(\lambda)$ приближалась к форме кривой для исходного образца, т. е. эффект дихроизма пропадал. В случае воздействия излучения с длиной волны 1030 ± 5 нм с *s*-поляризацией и плотностью энергии $F = 69 \pm 0,5$ мДж/см² значения LD составляли $LD_{500} = 0,05$ и $LD_{700} = 0,02$ (рис. 4, *c*). Рост плотности энергии до $F = 188 \pm 0,5$ мДж/см² приводил к росту LD до $LD_{500} = 0,08$ и $LD_{700} = 0,05$. Таким образом видно, что величина LD в пленке ZnO:Ag при использовании излучения с длиной волны вдали от положения пика плазмонного резонанса НЧ была ниже, чем при использовании излучения с длиной волны вблизи его положения.

Электронная микроскопия. При помощи СЭМ-изображений (рис. 5, *a*) были исследованы параметры серебряных НЧ в пленке, такие как размеры большой и малой осей частиц d_a и d_b , их концентрация и угол ориентации α_x , а также изменение морфологии матрицы ZnO. Угол α_x соответствовал углу между большой осью и осью *ox*, направление которой совпадало с направлением *p*-поляризации на рис. 1, *b*. Исходная пленка имела поликристаллическую структуру, НЧ находились внутри нее (рис. 5, *b*). Размеры осей НЧ в исходной пленке составляли $d_a = 41 \pm 5$ нм и $d_b = 37 \pm 5$ нм (рис. 5, *i, j*). При этом в распределении присутствовало около 15 % НЧ с размером d_a больше 60 нм (рис. 5, *i*). Такие НЧ имели ярко выраженную эллипсоидную форму. Повышение плотности энергии до $74 \pm 0,5$ мДж/см² существенно не изменяло морфологию пленки (рис. 5, *d*). Начиная с плотности энергии выше $74 \pm 0,5$ мДж/см² происходил выход НЧ на поверхность пленки (рис. 5, *e*). Аналогичный эффект наблюдался после отжига в печи при 650 °C и был

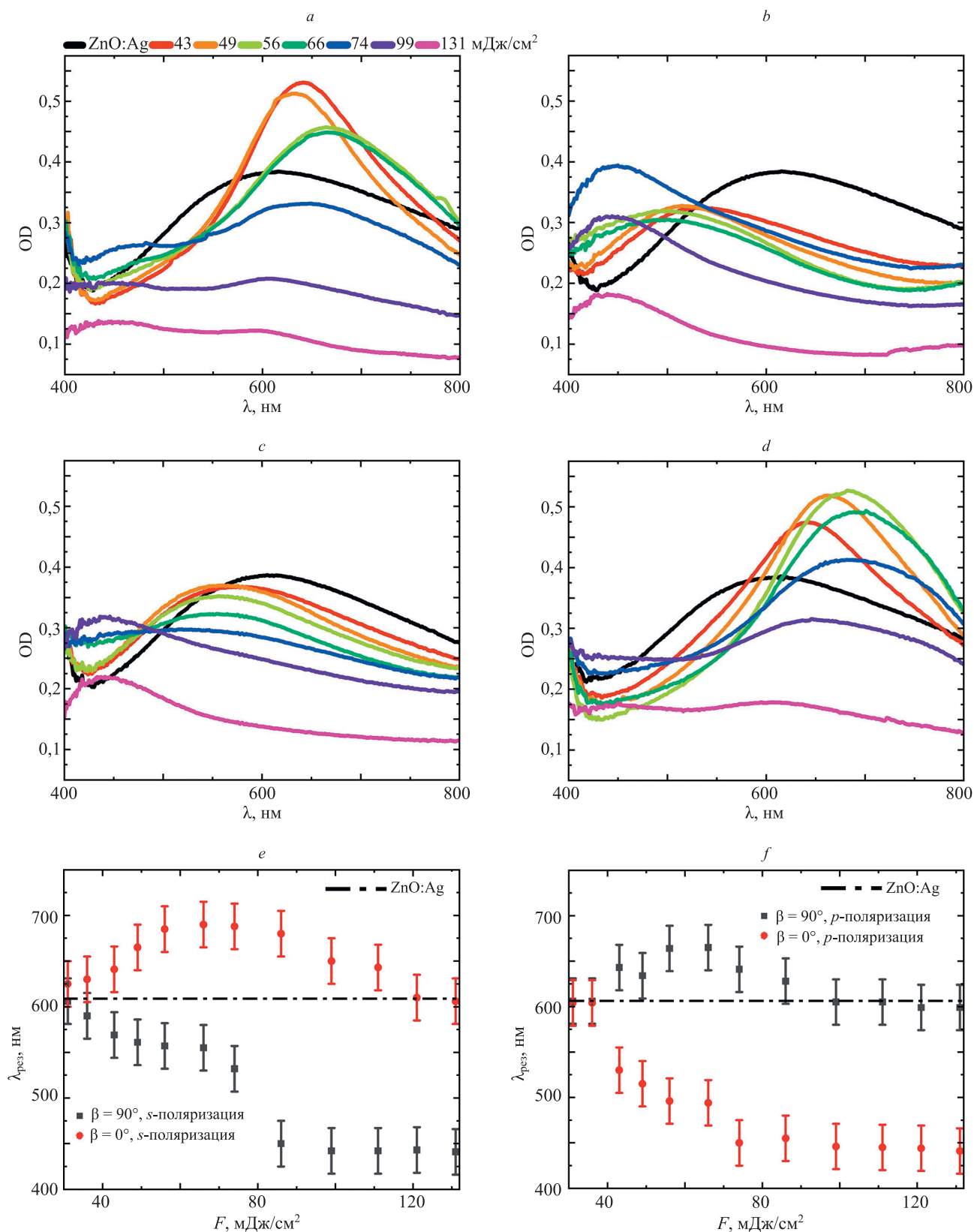


Рис. 3. Спектры оптической плотности областей пленки ZnO:Ag, модифицированных при помощи лазерного излучения с p -поляризацией (a, b) и s -поляризацией (c, d); углы между направлением трека и осью поляризатора составляли $\beta = 90^\circ$ (a, c) и $\beta = 0^\circ$ (b, d); зависимости длины волны плазмонного резонанса наночастиц от плотности энергии лазерных импульсов при s -поляризации (e) и p -поляризации (f) лазерного излучения

Fig. 3. Optical density spectra of ZnO:Ag film regions modified using laser radiation with p -polarization (a, b) and s -polarization (c, d); the angles between the track direction and the polarizer axis were $\beta = 90^\circ$ (a, c) and $\beta = 0^\circ$ (b, d); dependences of the plasmon resonance wavelength of nanoparticles on the energy density of laser pulses with s -polarization (e) and p -polarization (f) vs. laser radiation

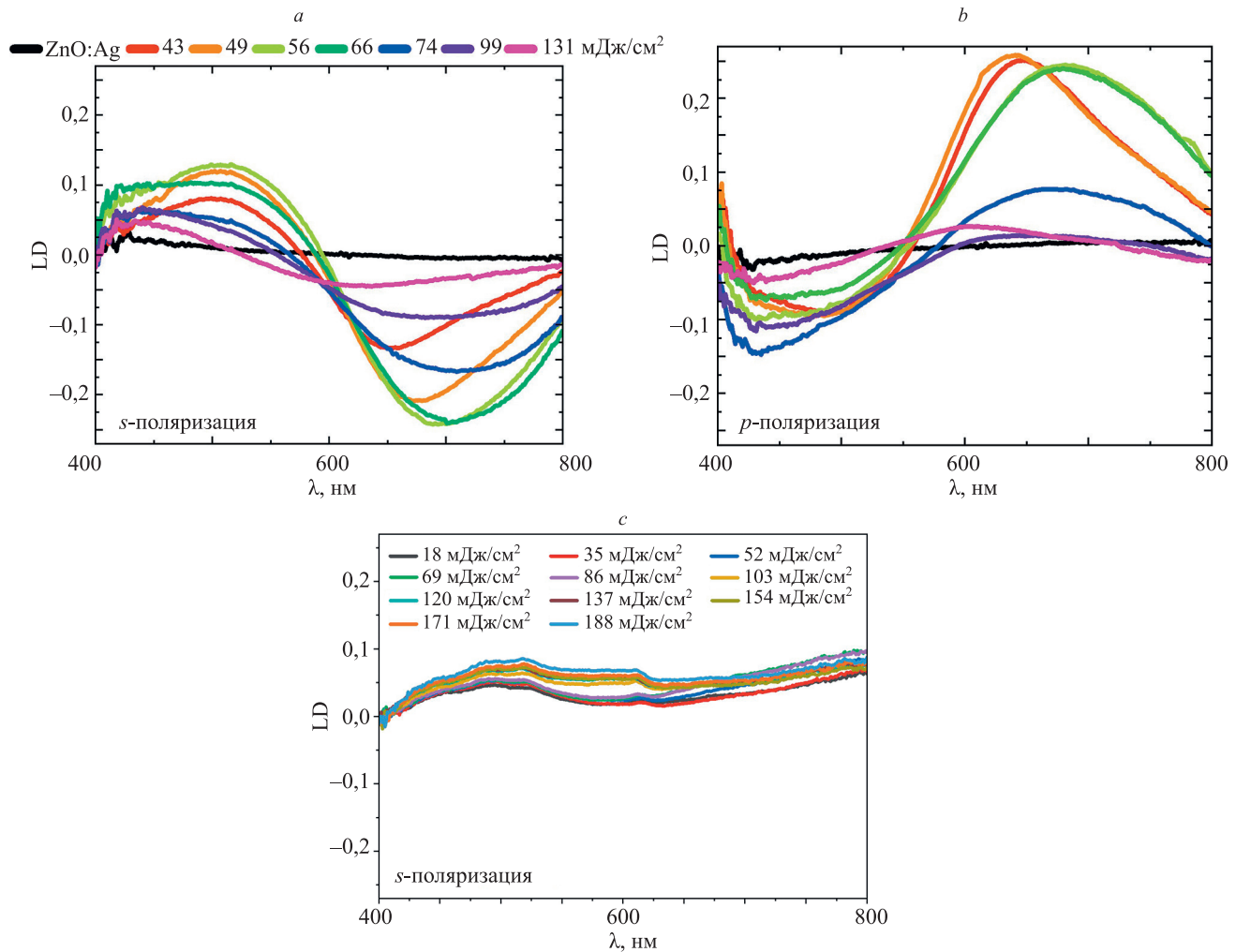


Рис. 4. Спектры линейного дихроизма в случае воздействия излучения с длинами волн: 515 нм (a, b) и 1030 нм (c)

Fig. 4. Linear dichroism spectra in the case of exposure to radiation with a wavelength of 515 nm (a, b) and radiation with a wavelength of 1030 nm (c)

связан с уплотнением матрицы ZnO вокруг НЧ [15]. С помощью метода EDX (Energy Dispersive X-ray) было показано, что лазерное воздействие слабо влияло на химический состав пленки (рис. 5, f). Кроме того, уменьшалась концентрация НЧ, и происходило их объединение в более крупные частицы. При плотности энергии выше $74 \pm 0,5$ мДж/см² в пределах треков наблюдались нерегулярные трещины продолговатой формы, ориентированные перпендикулярно линиям поляризации излучения (рис. 5, g, h). Формирование таких трещин зависит от интерференционных эффектов, возникающих при взаимодействии падающей и поверхностной электромагнитных волн [16]. При этом для формирования таких структур материал должен был нагреваться как минимум до температуры плавления [17]. Дальнейшее повышение плотности энергии приводило к увеличению количества таких трещин. Процессы, наблюдаемые при F более 74 мДж/см², приводили к тому, что эффект дихроизма в пленке начинал ослабевать, что наблюдалось по результатам оптической микроскопии и спектроскопии.

На основании данных об угле ориентации НЧ были построены гистограммы распределения количества НЧ

по углу ориентации (рис. 6, a, b, d, e). В распределениях не учитывались сферические НЧ, у которых аспектное соотношение $AR = d_a/d_b$ составляло $AR = 1$. Далее были рассчитаны отношения N_{90°/N_{0° , где N_{90° и N_{0° — количество НЧ, ориентированных с углом $\alpha_x = 90^\circ$ и $\alpha_x = 0^\circ$ (рис. 6, c, f). В исходной пленке НЧ были ориентированы хаотично, и отношение N_{90°/N_{0° было близко к единице (рис. 6, a, красный столбец). В режиме p -поляризации начиная с $F = 49 \pm 0,5$ мДж/см² росло число НЧ, ориентированных под углами близкими к 0° и 180° (рис. 6, a). Это свидетельствовало о том, что часть НЧ ориентировалась параллельно вектору поляризации лазерного излучения. При этих режимах воздействия также начинал проявляться эффект дихроизма (рис. 3). С увеличением плотности энергии до $66 \pm 0,5$ мДж/см² росла доля НЧ, ориентированных параллельно вектору поляризации, и отношение N_{90°/N_{0° уменьшалось (рис. 6, c). При дальнейшем увеличении плотности энергии до $131 \pm 0,5$ мДж/см² происходило постепенное снижение концентрации НЧ, отношение N_{90°/N_{0° увеличивалось до 1, а ориентация вновь становилась хаотичной (рис. 6, b). Эффект дихроизма при данных режимах лазерного воздействия становился все менее

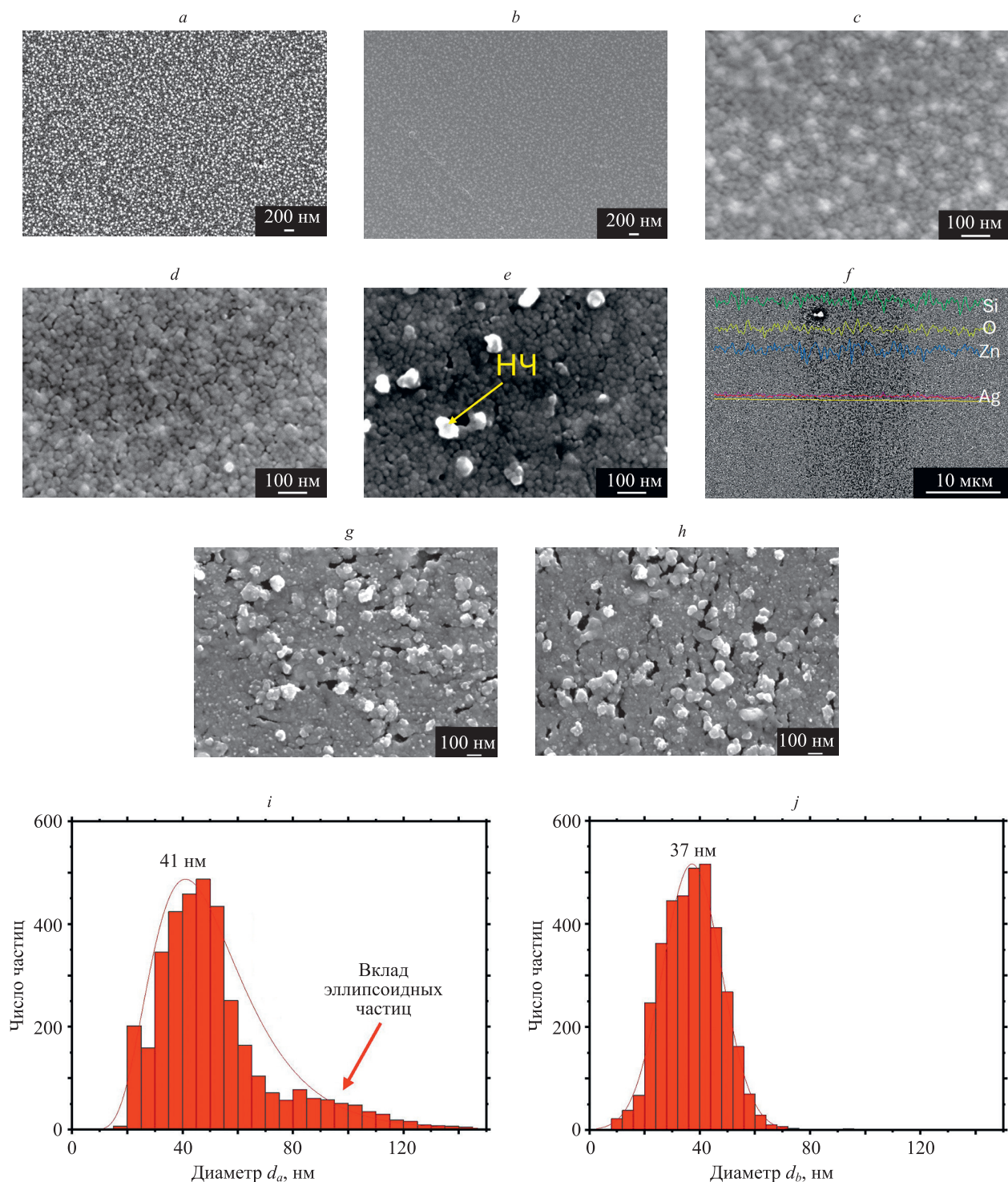


Рис. 5. СЭМ-снимки пленки ZnO:Ag до лазерного воздействия в режимах: обратно рассеянных электронов AsB (a); вторичных электронов InLens (b); исходная пленка с большим увеличением (c); после облучения при плотностях энергии $66 \pm 0,5$ мДж/см² (d) и $99 \pm 0,5$ мДж/см² (e). EDX измерения состава области пленки ZnO:Ag, облученной при плотностях энергии: $131 \pm 0,5$ мДж/см² (f) и $131 \pm 0,5$ мДж/см² в режиме s-поляризации (g); $131 \pm 0,5$ мДж/см² в режиме p-поляризации (h). Гистограммы с размерами большой d_a (i) и малой d_b (j) осей наночастиц в исходной пленке

Fig. 5. SEM images of the ZnO:Ag film before laser irradiation in the mode of: backscattered electrons AsB (a); secondary electrons InLens (b); the original film with high magnification (c); after irradiation at an energy density of 66 ± 0.5 mJ/cm² (d); 99 ± 0.5 mJ/cm² (e). EDX measurements of the composition of the ZnO:Ag film region irradiated at an energy density of 131 ± 0.5 mJ/cm² (f); 131 ± 0.5 mJ/cm² in the s-polarization mode (g); 131 ± 0.5 mJ/cm² in the p-polarization mode (h). Histograms with the sizes of the large d_a (i) and small d_b (j) axes of nanoparticles in the original film

выраженным. Вероятно, что при высокой плотности энергии на процесс изменения формы НЧ также начи-

нал оказывать влияние процесс модификации самой матрицы пленки. Нагретая под действием лазерного

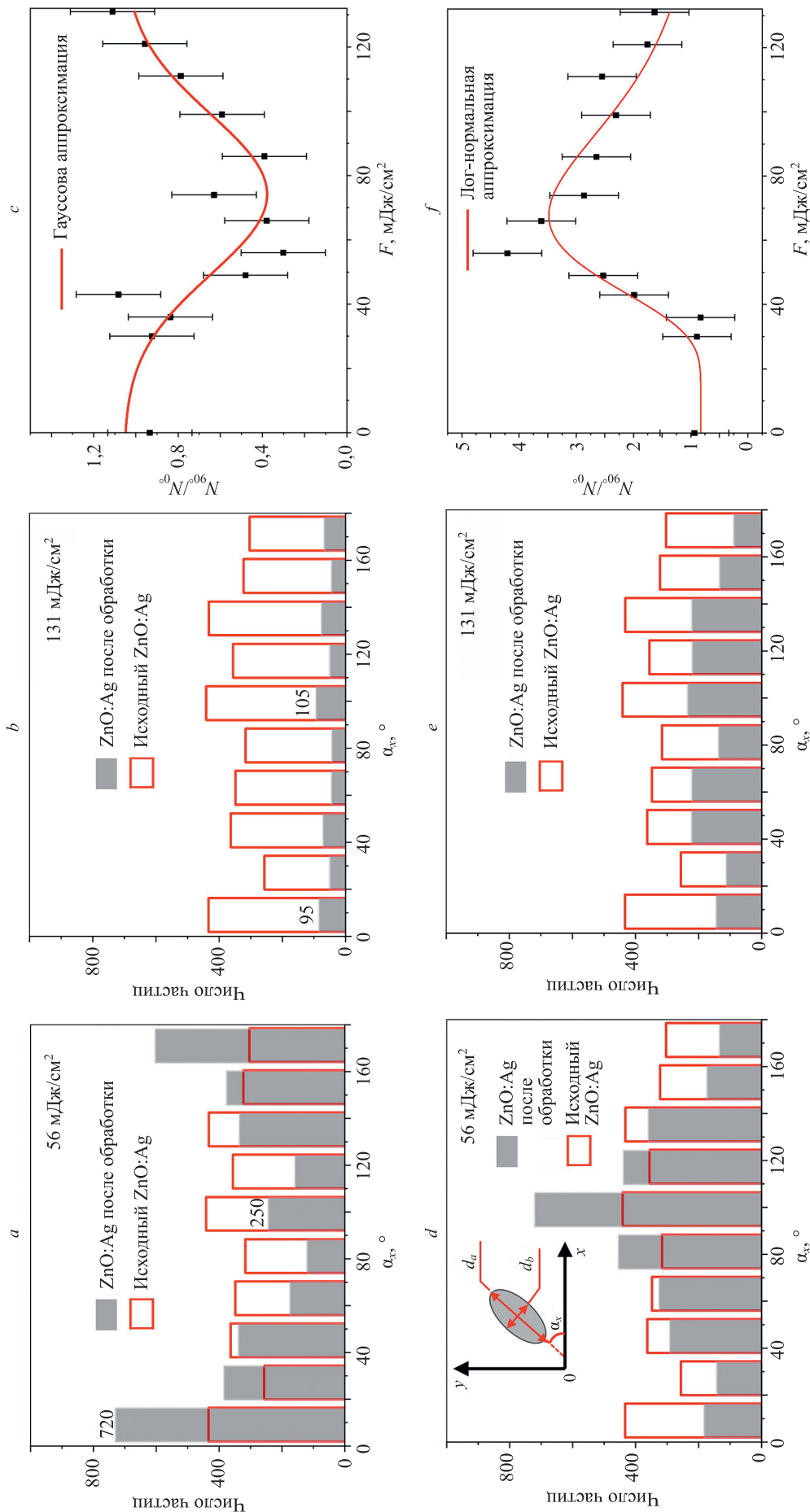


Рис. 6. Гистограммы распределения количества наночастиц по углам α_x между большей осью эллипсоидных наночастиц в пленке и осью ox до (значения выделены красным цветом) и после (значения выделены серым цветом) лазерного воздействия в режимах p - (a, b) и s -поляризации (d, e) при плотности энергии $(31-131) \pm 0,5$ мДж/см². На вставке на рис. d указаны измеряемые параметры отношения количества наночастиц, ориентированных под углом 90° N_{90° к количеству наночастиц, ориентированных под углом 0° N_{0° от плотности энергии при p - (c) и s -поляризации (f)

Fig. 6. Histograms of the distribution of the number of nanoparticles by angles α_x between the major axis of ellipsoidal nanoparticles in the film and the ox axis before (values are highlighted in red) and after (values are highlighted in gray) laser exposure in the p - (a, b) and s -polarization (d, e) modes at the energy density from 31 ± 0.5 to 131 ± 0.5 mJ/cm². The inset in Fig. d shows the measured parameters of the nanoparticles. Dependences of the ratio of the number of nanoparticles oriented at an angle of 90° N_{90° to the number of nanoparticles oriented at an angle of 0° N_{0° vs. the energy density for p -polarization (c), s -polarization (f)

излучения с высокой плотностью энергии импульсов пленка начинала передавать тепло НЧ [6]. Подобная переориентация НЧ наблюдалась и при s -поляризации лазерного излучения. Начиная с $F = 43 \pm 0,5$ мДж/см² росла доля НЧ, ориентированных под углом 90°, что приводило к увеличению отношения до 4 (рис. 6, f). Этот процесс продолжался до $F = 56 \pm 0,5$ мДж/см² (рис. 6, d), после чего отношение N_{90°/N_{0° также умень-

шалось до 1. Как в режиме p -поляризации, так и в режиме s -поляризации фемтосекундного излучения ориентация НЧ происходила вдоль вектора поляризации лазерного излучения.

На основании представленных данных можно заключить, что изменение спектральных характеристик на рис. 4 было связано с изменением доли НЧ, ориентированных параллельно вектору поляризации ла-

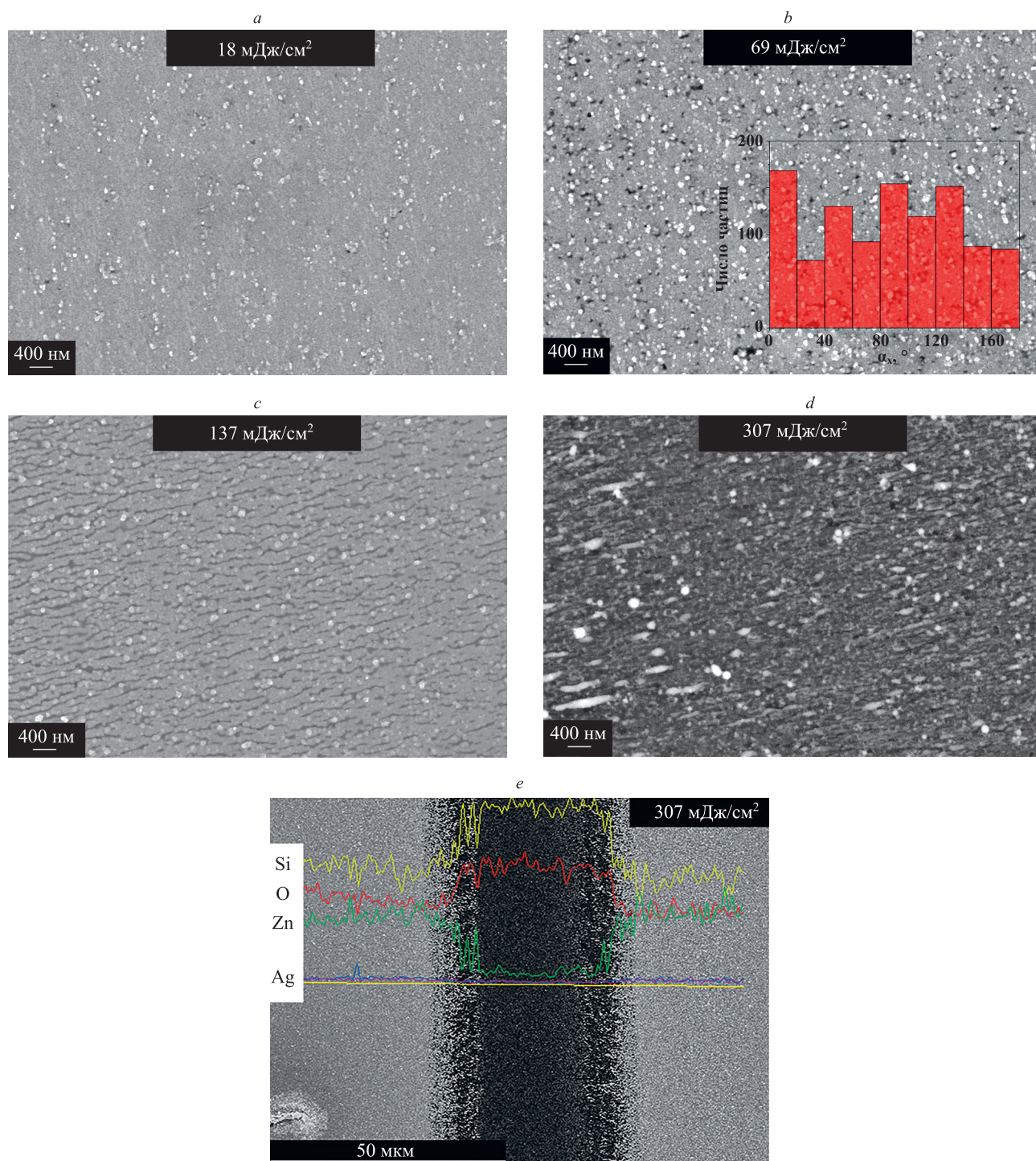


Рис. 7. СЭМ-изображения пленки ZnO:Ag модифицированной излучением с длиной волны 1030 нм с плотностями энергии: $18 \pm 0,5$ мДж/см² (a); $69 \pm 0,5$ мДж/см² (b); $137 \pm 0,5$ мДж/см² (c); $307 \pm 0,5$ мДж/см² (d). Измерение состава методом EDX (e)

Fig. 7. SEM images of ZnO:Ag film modified with 1030 nm radiation: 18 ± 0.5 мДж/см² (a), 69 ± 0.5 мДж/см² (b), 137 ± 0.5 мДж/см² (c), 307 ± 0.5 мДж/см² (d). Composition measurement was done by EDX method (e)

зерного излучения. При этом больший вклад должны были вносить эллипсоидные НЧ, присутствующее в распределении изначально. В исходной пленке, а также при низкой плотности энергии (до $43\text{--}49\text{ мДж/см}^2$) эллипсоидные НЧ ориентированы хаотично. В этом случае отсутствовал LD, и пик плазмонного резонанса находился вблизи 600 нм. Увеличение плотности энергии лазерного излучения приводило к ориентации части эллипсоидных НЧ параллельно вектору поляризации лазерного излучения. За счет этого расстояние между НЧ уменьшалось в одном направлении и увеличивалось в другом. При измерении спектров пропускания линейно-поляризованного излучения, если вектор поляризации света в спектрофотометре, был ориентирован параллельно вектору поляризации лазерного излучения, то расстояние между НЧ в этом направлении было меньшим. Между НЧ с большей вероятностью могли возникать коллективные плазмонные эффекты [18]. За счет этого происходило смещение пика плазмонного резонанса в длинноволновую область спектра и увеличение значения OD (рис. 3). При значениях плотности энергии выше $66 \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$ ориентация НЧ нарушалась вследствие их частичного разрушения и агрегации в более крупные. Из-за этого пик плазмонного резонанса смещался в область меньших длин волн, а его интенсивность уменьшалась. СЭМ-изображения пленки, модифицированной излучением ОГ представлены на рис. 7. Выход НЧ на поверхность начинался уже при $F = 18 \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$, при этом число НЧ на поверхности росло с увеличением плотности энергии. При плотности энергии выше $69 \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$ (рис. 7, *b*) происходило формирование протяженных структур, перпендикулярных направлению поляризации. Их длина росла с увеличением плотности энергии. После значения $F = 137 \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$ (рис. 7, *c*) в центре трека начиналась абляция пленки, ширина аблированного участка росла вплоть до $F = 307 \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$. EDX измерения области, модифицированной с максимальной плотностью энергии, показали значительное уменьшение концентрации Zn в пределах трека (рис. 7, *d*). Анализ угла ориентации НЧ показал, что в отличие от случая воздействия излучения ВГ, НЧ продолжали сохранять хаотическую ориентацию и после лазерного воздействия (рис. 7, *e*). Предположительно, это связано с различием в механизмах поглощения лазерного излучения.

В случае воздействия излучения ВГ поглощательная способность пленки ZnO:Ag составляла $A_{515}(\text{ZnO:Ag}) = 0,54$, а пленки ZnO без НЧ на длине волны ВГ — $A_{515}(\text{ZnO}) = 0,07$. Из этого можно сделать вывод, что лазерное излучение поглощалось преимущественно НЧ серебра. Под действием фемтосекундных лазерных импульсов с плотностью энергии выше $43 \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$ происходила эмиссия электронов из НЧ [19]. Предположительно, эти электроны рекомбинировали с ионами серебра в окружении НЧ. Если расстояние от НЧ до области рекомбинации было не велико, то новые атомы серебра диффундировали обратно к НЧ. Поскольку эти процессы индуцировались под действием линейно-поляризованного лазерного излучения, то наиболее активно они происходили в

направлении, параллельном вектору поляризации. За счет этого осуществлялась переориентация НЧ, и наблюдался эффект дихроизма. Можно утверждать, что при плотности энергии выше $66 \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$ электроны из НЧ удалялись на более значительное расстояние чем при значениях плотности энергии в диапазоне $43\text{--}66\text{ мДж/см}^2$. Атомы серебра уже были не способны диффундировать к исходной НЧ. Однако, при наличии в окружении достаточно крупных частиц, компоненты разрушенной НЧ могли участвовать в процессе объединения, что и наблюдалось при плотности энергии выше $66 \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$ (рис. 5, *e*).

В случае лазерного воздействия излучением ОГ поглощательная способность пленки ZnO:Ag составляла $A_{1030}(\text{ZnO:Ag}) = 0,14$, что было незначительно выше для пленки ZnO без НЧ: $A_{1030}(\text{ZnO}) = 0,06$. Отметим, что в таком случае доля лазерного излучения, поглощенная на НЧ и доля лазерного излучения, поглощенная на матрице ZnO, были соизмеримы. НЧ поглощала излучение, и в ней начинали происходить процессы, описанные для случая воздействия излучения ВГ. За счет низкого поглощения интенсивность этих процессов была не велика. В то же время под действием излучения нагревалась матрица ZnO, и часть тепла за счет теплопроводности передавалась из матрицы к НЧ. При этом тепло передавалось к НЧ со всех сторон, т. е. этот процесс не имел выраженного направления. Эти тепловые процессы в матрице препятствовали переориентации НЧ и появлению эффекта дихроизма.

Закключение

В ходе проведенного исследования установлено, что фемтосекундное лазерное воздействие на пленки ZnO с наночастицами серебра может вызывать значительные изменения их структуры и оптических свойств, приводящие к возникновению эффекта дихроизма. Воздействие на длине волны вблизи плазмонного резонанса наночастиц ($\lambda = 515 \pm 5\text{ нм}$) оказалось наиболее эффективным для создания эффекта дихроизма. При воздействии излучения с плотностью энергии $66 \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$ величина линейного дихроизма на длине волны 700 нм составляла $-0,25$ и $0,25$ при *s*- и *p*-поляризациях лазерного излучения соответственно. Появление эффекта дихроизма связывалось с переориентацией наночастиц в поле лазерного излучения. В исходной пленке наночастицы были ориентированы хаотично, но с увеличением плотности энергии до 66 мДж/см^2 росла доля частиц, ориентированных параллельно поляризации лазерного излучения. Воздействие с длиной волны вдали от длины волны плазмонного резонанса наночастиц ($\lambda = 1030 \pm 5\text{ нм}$) оказало значительно меньшее влияние на анизотропию формы наночастиц и изменение оптических характеристик пленок ZnO:Ag, даже при более широком диапазоне плотностей энергии $(18\text{--}307) \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$. Максимум в спектрах линейного дихроизма при таком воздействии находился вблизи 500 нм, величина линейного дихроизма составляла $0,05$ при $69 \pm 0,5\text{ мДж/см}^2$. Наночастицы при этом все так же имели хаотическую

ориентацию. Лазерное воздействие с режимами, которые были определены в данной работе, позволяет управлять положением пика плазмонного резонанса наночастиц в фотопоглощающем слое фотодетектора,

а также создавать на этом слое области с эффектом дихроизма. За счет этого расширяются возможности по модификации диапазона спектральной чувствительности устройства.

Литература

1. Klochko N.P., Klepikova K.S., Khrypunova I.V., Kopach V.R., Tyukhov I.I., Petrushenko, S.I., Dukarov S.V., Sukhov V.M., Kirichenko M.V., Khrypunova A.L. Solution-processed flexible broadband ZnO photodetector modified by Ag nanoparticles // *Solar Energy*. 2022. V. 232. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.051>
2. Tang H., Chen C.J., Huang Z., Bright J., Meng G., Liu R.S., Wu N. Plasmonic hot electrons for sensing, photodetection, and solar energy applications: A perspective // *The Journal of Chemical Physics*. 2020. V. 152. N 22. <https://doi.org/10.1063/5.0005334>
3. Alharbi A.M., Ahmed N.M., Rahman A.A., Azman N.Z.N., Algburi S., Wadi I.A., Binzowaimil A.M., Aldaghri O., Ibnaouf K.H. Development of ZnO and Si semiconductor-based ultraviolet photodetectors enhanced by laser-ablated silver nanoparticles // *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*. 2024. V. 58. P. 101228. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2024.101228>
4. Koleva M.E., Nedyalkov N.N., Nikov Ru., Nikov Ro., Atanasova G., Karashanova D., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Stepanov A.L. Fabrication of Ag/ZnO nanostructures for SERS applications // *Applied Surface Science*. 2020. V. 508. P. 145227. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145227>
5. Jain S., Medlin W., Uprety S., Isaacs-Smith T., Olsson T., Davis J., Burrows S., Chumley S., Park M., Laurent G.M. Nanosecond-laser annealing of zinc oxide thin-films: The effect of the laser wavelength and fluence // *Thin Solid Films*. 2024. V. 791. P. 140236. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140236>
6. Varlamov P.V., Sergeev M.M., Zakoldaev R.A., Grigoryev E.A. Femtosecond wavelength influence on TiO₂: Ag film spectral changes: Comparative study // *Materials Letters*. 2022. V. 323. P. 132605. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132605>
7. Andreeva Y., Sharma N., Rudenko A., Mikhailova J., Sergeev M., Veiko V.P., Vocanson F., Lefkir Y., Destouches N., Itina T.E. Insights into ultrashort laser-driven Au: TiO₂ nanocomposite formation // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2020. V. 124. N 18. P. 10209–10219. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c01092>
8. Miranda M.H.G., Falcão-Filho E.L., Rodrigues Jr. J.J., de Araújo C.B., Acioli L.H. Ultrafast light-induced dichroism in silver nanoparticles // *Physical Review B*. 2004. V. 70. N 16. P. 161401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.161401>
9. Stalmashonak A., Seifert G., Graener H. Spectral range extension of laser-induced dichroism in composite glass with silver nanoparticles // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2009. V. 11. N 6. P. 065001. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/6/065001>
10. Греско В.Р., Сергеев М.М., Смирнова В.В., Долгополов А.Д., Сокура Л.А., Костюк Г.К., Григорьев Е.А. Фемтосекундная лазерная модификация золь-гель пленок ZnO:Ag с проявлением дихроизма // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2024. Т. 24. № 3. С. 384–398. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-3-384-398>
11. Liu J.M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes // *Optics letters*. 1982. V. 7. N 5. P. 196–198. <https://doi.org/10.1364/OL.7.000196>
12. Yeshchenko O.A., Dmitruk I.M., Alexeenko A.A., Kotko A.V., Verdal J., Pinchuk A.O. Size and temperature effects on the surface plasmon resonance in silver nanoparticles // *Plasmonics*. 2012. V. 7. P. 685–694. <https://doi.org/10.1007/s11468-012-9359-z>
13. Shirshneva-Vaschenko E.V., Sokura L.A., Baidakova M.V., Yagovkina M.A., Snezhnaia Z.G., Shirshnev P.S., Romanov A.E. Study of the influence of the ZnO: Al polycrystalline film morphology on the silver nanoparticles formation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1400. N 5. P. 055026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055026>
14. Kuptsova A.O., Kuptsov G.V., Petrov V.A., Atuchin V.V., Petrov V.V. Laser scanning method for time-resolved measurements of wavefront distortion introduced by active elements in high-power laser

References

1. Klochko N.P., Klepikova K.S., Khrypunova I.V., Kopach V.R., Tyukhov I.I., Petrushenko, S.I., Dukarov S.V., Sukhov V.M., Kirichenko M.V., Khrypunova A.L. Solution-processed flexible broadband ZnO photodetector modified by Ag nanoparticles. *Solar Energy*, 2022, vol. 232, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.051>
2. Tang H., Chen C.J., Huang Z., Bright J., Meng G., Liu R.S., Wu N. Plasmonic hot electrons for sensing, photodetection, and solar energy applications: A perspective. *The Journal of Chemical Physics*, 2020, vol. 152, no. 22. <https://doi.org/10.1063/5.0005334>
3. Alharbi A.M., Ahmed N.M., Rahman A.A., Azman N.Z.N., Algburi S., Wadi I.A., Binzowaimil A.M., Aldaghri O., Ibnaouf K.H. Development of ZnO and Si semiconductor-based ultraviolet photodetectors enhanced by laser-ablated silver nanoparticles. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2024, vol. 58, pp. 101228. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2024.101228>
4. Koleva M.E., Nedyalkov N.N., Nikov Ru., Nikov Ro., Atanasova G., Karashanova D., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Stepanov A.L. Fabrication of Ag/ZnO nanostructures for SERS applications. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 508, pp. 145227. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145227>
5. Jain S., Medlin W., Uprety S., Isaacs-Smith T., Olsson T., Davis J., Burrows S., Chumley S., Park M., Laurent G.M. Nanosecond-laser annealing of zinc oxide thin-films: The effect of the laser wavelength and fluence. *Thin Solid Films*, 2024, vol. 791, pp. 140236. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140236>
6. Varlamov P.V., Sergeev M.M., Zakoldaev R.A., Grigoryev E.A. Femtosecond wavelength influence on TiO₂: Ag film spectral changes: Comparative study. *Materials Letters*, 2022, vol. 323, pp. 132605. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132605>
7. Andreeva Y., Sharma N., Rudenko A., Mikhailova J., Sergeev M., Veiko V.P., Vocanson F., Lefkir Y., Destouches N., Itina T.E. Insights into ultrashort laser-driven Au: TiO₂ nanocomposite formation. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2020, vol. 124, no. 18, pp. 10209–10219. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c01092>
8. Miranda M.H.G., Falcão-Filho E.L., Rodrigues Jr. J.J., de Araújo C.B., Acioli L.H. Ultrafast light-induced dichroism in silver nanoparticles. *Physical Review B*, 2004, vol. 70, no. 16, pp. 161401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.161401>
9. Stalmashonak A., Seifert G., Graener H. Spectral range extension of laser-induced dichroism in composite glass with silver nanoparticles. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, vol. 11, no. 6, pp. 065001. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/6/065001>
10. Gresko V.R., Sergeev M.M., Smirnova V.V., Dolgoplov A.D., Sokura L.A., Kostyuk G.K., Grigoryev E.A. Femtosecond laser modification of the ZnO:Ag sol-gel films within dichroism emergence. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 384–398. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-3-384-398>
11. Liu J.M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes. *Optics letters*, 1982, vol. 7, no. 5, pp. 196–198. <https://doi.org/10.1364/OL.7.000196>
12. Yeshchenko O.A., Dmitruk I.M., Alexeenko A.A., Kotko A.V., Verdal J., Pinchuk A.O. Size and temperature effects on the surface plasmon resonance in silver nanoparticles. *Plasmonics*, 2012, vol. 7, pp. 685–694. <https://doi.org/10.1007/s11468-012-9359-z>
13. Shirshneva-Vaschenko E.V., Sokura L.A., Baidakova M.V., Yagovkina M.A., Snezhnaia Z.G., Shirshnev P.S., Romanov A.E. Study of the influence of the ZnO: Al polycrystalline film morphology on the silver nanoparticles formation. *Conference Series*, 2019, vol. 1400, no. 5, pp. 055026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055026>
14. Kuptsova A.O., Kuptsov G.V., Petrov V.A., Atuchin V.V., Petrov V.V. Laser scanning method for time-resolved measurements of wavefront distortion introduced by active elements in high-power laser

- amplifiers // *Photonics*, 2024. V. 11. N 8. P. 748. <https://doi.org/10.3390/photronics11080748>
15. Shirshneva-Vaschenko E.V., Sokura L.A., Shirshnev P.S., Kirilenko D.A., Snezhnaia Z.G., Bauman D.A., Bougrov V.E., Romanov A.E. Preparation of transparent N-ZnO: Al/P-CuAlCrO₂ Heterojunction Diode by Sol-Gel technology // *Reviews on Advanced Materials Science*, 2018. V. 57. N 2. P. 167–174. <https://doi.org/10.1515/rams-2018-0061>
 16. Buividas R., Mikutis M., Juodkazis S. Surface and bulk structuring of materials by ripples with long and short laser pulses: Recent advances // *Progress in Quantum Electronics*, 2014. V. 38. N 3. P. 119–156. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2014.03.002>
 17. Zamfirescu M., Dinescu A., Danila M., Socol G., Radu C. The role of the substrate material type in formation of laser induced periodical surface structures on ZnO thin films // *Applied surface science*, 2012. V. 258. N 23. P. 9385–9388. <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2012.01.089>
 18. Sokura L.A., Snezhnaia Zh.G., Nevedomskiy V.N., Shirshneva-Vaschenko E.V., Romanov A.E. Ordering mechanism of silver nanoparticles synthesized in a ZnO: Al polycrystalline film by sol gel method // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. V. 1695. P. 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1695/1/012034>
 19. Kaempfe M., Seifert G., Berg K.-J., Hofmeister H., Graener H. Polarization dependence of the permanent deformation of silver nanoparticles in glass by ultrashort laser pulses // *The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, 2001. V. 16. P. 237–240. <https://doi.org/10.1007/s100530170100>

Авторы

Греско Владислав Романович — младший научный сотрудник, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57211848411](https://orcid.org/0000-0003-3308-6034), <https://orcid.org/0000-0003-3308-6034>, gresko.97@mail.ru

Сергеев Максим Михайлович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55624732300](https://orcid.org/0000-0003-2854-9954), <https://orcid.org/0000-0003-2854-9954>, maxim.m.sergeev@gmail.com

Долгополов Артур Джуракулович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-9548-791X>, addolgoplov@itmo.ru

Сокура Лилия Александровна — научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 56662497100](https://orcid.org/0000-0001-9725-5912), <https://orcid.org/0000-0001-9725-5912>, sokuraliliy@mail.ru

Григорьев Евгений Анатольевич — специалист по сканирующей электронной микроскопии, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, [sc 6603077950](https://orcid.org/0000-0003-0614-6695), <https://orcid.org/0000-0003-0614-6695>, grigoryev_egeniy@mail.ru

Authors

Vladislav R. Gresko — Junior Researcher, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57211848411](https://orcid.org/0000-0003-3308-6034), <https://orcid.org/0000-0003-3308-6034>, gresko.97@mail.ru

Maksim M. Sergeev — PhD, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55624732300](https://orcid.org/0000-0003-2854-9954), <https://orcid.org/0000-0003-2854-9954>, maxim.m.sergeev@gmail.com

Arthur D. Dolgoplov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9548-791X>, addolgoplov@itmo.ru

Liliia A. Sokura — Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Scientific Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 56662497100](https://orcid.org/0000-0001-9725-5912), <https://orcid.org/0000-0001-9725-5912>, sokuraliliy@mail.ru

Evgeniy A. Grigoryev — Scanning Electron Microscopy Specialist, St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, [sc 6603077950](https://orcid.org/0000-0003-0614-6695), <https://orcid.org/0000-0003-0614-6695>, grigoryev_egeniy@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.11.2024

Одобрена после рецензирования 25.12.2024

Принята к печати 25.01.2025

Received 26.11.2024

Approved after reviewing 25.12.2024

Accepted 25.01.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»