Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 7, с. 383 – 390

Фемтосекундная лазерная запись микробитов для люминесцентной оптической памяти в сапфире

П. А. Данилов[+], А. В. Горевой[+1)], И. Д. Матяев[+], И. В. Гриценко[+], В. Н. Курлов[×], С. И. Кудряшов[+]*

[+] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

[*] *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва, Россия*

[×] *Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна РАН, 142432 Черноголовка, Россия*

Поступила в редакцию 14 августа 2025 г.
После переработки 1 сентября 2025 г.
Принята к публикации 1 сентября 2025 г.

Модификация объема синтетического оптического сапфира сфокусированными ($\mathrm{NA} = 0.55$) фемтосекундными (150 фс) лазерными импульсами с длиной волны 525 нм демонстрирует формирование микрообластей размером $2 \times 2 \times 25\,\text{мкм}^3$ с увеличением люминесценции в полосе 700–850 нм, связанной с образованием сложных комплексов вакансий F_2 и F_2^{2+} и ионов Cr^{3+}. При энергии в импульсе 5–22.5 нДж не происходит повреждения кристаллической решетки сапфира, что делает данный режим обработки перспективным при записи трехмерных микрокодов для люминесцентной оптической памяти с емкостью до $10\,\text{Гбит/см}^3$ и их безошибочного считывания при однофотонной лазерной накачке.

DOI: 10.31857/S0370274X25100013, EDN: ERBNVY

1. Введение. Модификация поверхности и объема полупроводниковых и диэлектрических материалов ультракороткими лазерными импульсами (УКИ) находит широкое применение в разнообразных приложениях: записи волноводов, производстве двулучепреломляющих элементов и метаповерхностей [1–4]. С точки зрения вложения энергии механизмы взаимодействия УКИ с диэлектриками достаточно хорошо изучены и связаны с нелинейными процессами многофотонной, туннельной или лавинной фотоионизации [5]. Распределение электронов по состояниям в результате одно- или многофотонного фотовозбуждения оказывает существенное влияние на последующую релаксацию электронной подсистемы, что задает общий нелинейный характер электронной динамики. Это позволяет управляемо реализовать различные типы лазерной модификации поверхности и объема широкого круга материалов.

Развитие искусственного интеллекта, облачных технологий и “Интернета вещей” приводит к постоянному значительному увеличению объемов новых и архивных данных. Это, в свою очередь, создает потребность в поиске новых долговечных, эффективных и устойчивых к внешним воздействиям методах хранения информации. В настоящее время активно развивается направление оптической 3D-памяти, где в качестве одиночных носителей информации используются нанополости, периодические нанорешетки и фотолюминесцентные микробиты, запись которых производится в объеме прозрачных диэлектриков с изменением азимута поляризации и мощности УКИ [6–10]. Современные облачные хранилища и дата-центры используют в основном магнитные (HDD) и твердотельные (SSD) накопители с достаточно большой емкостью (1–100 ТБ) и высокой скоростью считывания до 5–10 Гбит/с. Оптические носители информации за счет плотной трехмерной упаковки микробитов обладают потенциально большей емкостью при сопоставимых размерах, однако имеют более низкую скорость чтения (10–100 Мбит/с) и еще более низкую скорость записи (< 2 Мбит/с), что в данный момент и определяет их основную возможную область использования как долговременное (“ледяное”) хранение информации без перезаписи [7, 10].

Наиболее разработанная в настоящее время технология оптической памяти основывается на лазерно-индуцированной анизотропии показателя преломления в кварцевом или пористом стекле за счет двулучепреломления [11, 12]. Однако, реальное применение технологии ограничивается высокими требованиями к чистоте и однородности используемых материалов и потерями на рассеяние при многослойной записи элементов с большим двулучепреломлением. Поэтому активно развивается и другое направление – фотолюминесцентная оптическая память, принцип которой

[1)] e-mail: a.gorevoy@lebedev.ru

основан на формировании с помощью УКИ люминесцирующих микро- и нанообластей (микро- и нанобитов) в различных материалах, таких как фотополимеры, легированные стекла, квантовые точки [13–15]. Для долговременного хранения информации ("ледяная" память) микробиты могут быть сформированы в кристаллической решетке таких прочных материалов, как алмаз и карбид кремния за счет локального формирования вакансионно-междоузельных пар под действием лазерных УКИ с пространственно-временной фокусировкой [16–18]. Другим оптическим материалом, перспективным для использования в качестве носителя фотолюминесцентной памяти, является синтетический сапфир или лейкосапфир (α-Al_2O_3). Этот кристалл отличается высокой твердостью и химической инертностью, стоек к высоким температурам, обладает хорошими теплофизическими свойствами и прозрачен в диапазоне 0.2–5 мкм, что обуславливает его широкое применение в качестве оптических элементов (окон, линз) [19, 20], волноводов [21], подложек для микроэлектроники [22, 23] и детекторов излучения [24]. Лазерные УКИ позволяют создавать на поверхности и в объеме сапфира анизотропные модификации показателя преломления [25], нанорешетки и фазовые пластины [26], а также трехмерные сети микроканалов за счет локальной аморфизации материала с последующим химическим травлением [27, 28]. Внедрение различных примесей (ионы железа, хрома, титана, магния и др.) и образование дефектов кристаллической решетки в процессе синтеза кристалла формирует в запрещенной зоне сапфира локализованные электронные состояния и высокостабильные люминесцентные центры, которые могут использоваться для оптической памяти [29].

В данной работе мы проводим исследование свойств люминесцентных микробитов, сформированных в объеме оптического синтетического сапфира под действием фемтосекундных (150 фс) лазерных импульсов с длиной волны 525 нм. Были обнаружены два режима модификации, характеризующихся широкой полосой фотолюминесценции (ФЛ) 700–900 нм различной интенсивности. В настоящей работе впервые продемонстрирована возможность использования найденных режимов модификации для лазерной записи и считывания люминесцентных микробитов как составных элементов 2D и 3D-микрокода фотолюминесцентной оптической памяти на бесцветном синтетическом сапфире.

2. Материалы и методы. Исследуемый образец представлял собой полированную пластину монокристаллического синтетического сапфира (α-Al_2O_3) толщиной 2 мм и поперечными размерами 10×20 мм^2. Спектр пропускания образца, измеренный на спектрофотометре СФ-2000 (ЛОМО, Россия) и показанный на рис. 1a, демонстрирует интенсивное поглощение около 205 нм (6.05 эВ), которое может быть связано с наличием F-центров (кислородных вакансий с двумя электронами), а также полосу поглощения с центром ≈ 255 нм (4.85 эВ), которая может соответствовать F^+-центрам или примесным Fe^{3+} ионам [30–33]. В спектре комбинационного рассеяния света (рис. 1b), полученном при накачке лазерным излучением с длиной волны $\lambda_p = 532$ нм, присутствуют типичные полосы колебаний решетки синтетического сапфира с центрами 378, 418, 645 и 750 см$^{-1}$ (A_{1g} и E_g колебательные моды) [34, 35].

Локальная модификация образца осуществлялась на установке, схема которой показана на рис. 1c. В качестве основного источника излучения был использован твердотельный Yb-лазер TEMA-150DUO (Авеста, Россия) со следующими параметрами выходного излучения: длина волны $\lambda_w = 525$ нм, длительность импульса 150 фс, частота следования импульсов 80 МГц. Для записи массивов фотолюминесцентных меток образец был установлен на трехкоординатную моторизованную платформу (Prior Scientific, UK) и лазерное излучение было сфокусировано на глубине 50–250 мкм (с учетом показателя преломления сапфира $n \approx 1.77$) при помощи микрообъектива ($50\times$, $\mathrm{NA} = 0.55$). С целью определения возможных режимов модификации мощность P лазерного излучения и время экспозиции t при записи изменялись в диапазонах от 0.4 до 2.5 Вт (соответствует энергии импульса E от 5 до 31 нДж) и от 0.5 до 32 с (от 4×10^7 до 2.56×10^9 импульсов) соответственно. В схеме был дополнительно предусмотрен канал визуализации записанных меток в проходящем излучении от источника белого света.

Измерение спектров ФЛ и комбинационного рассеяния света было выполнено при помощи конфокального сканирующего микроскопа-спектрометра Confotec MR520 (SOL Instruments, Беларусь) при возбуждении непрерывным лазерным излучением с $\lambda_p = 405$ нм и $\lambda_p = 532$ нм. Для использованного микрообъектива ($40\times$, $\mathrm{NA} = 0.75$), решетки (300 мм$^{-1}$) и других параметров спектральное разрешение составляло около 3 см$^{-1}$ (< 0.1 нм), а поперечное и продольное пространственное разрешение – около 1 и 10 мкм соответственно. Визуализация записанных меток в проходящем излучении для определения повреждений и напряжений в материале была проведена на микроскопе (Альтами, Россия) с объективами $50\times$

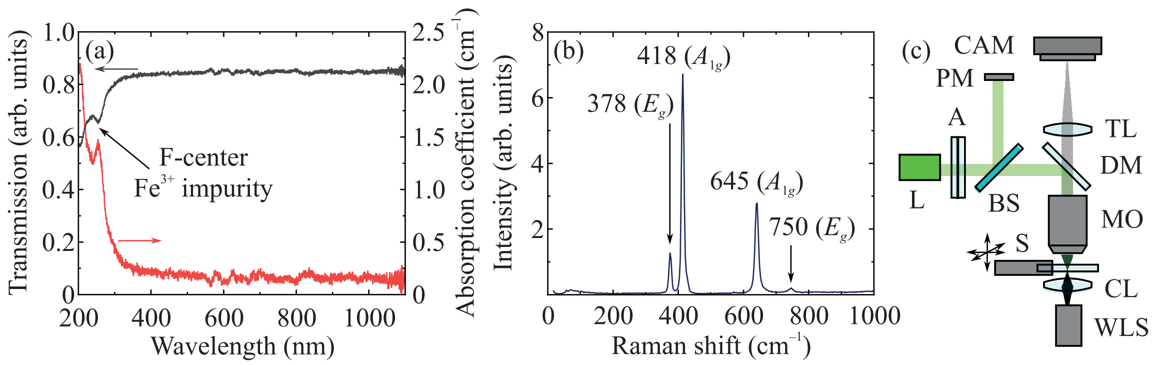

Рис. 1. (Цветной онлайн) Спектры пропускания (черный, левая шкала) и поглощения (красный, правая шкала) (a), а также комбинационного рассеяния света (b) для исследуемого образца сапфира и схема установки для его микромодификации (c): L – фемтосекундный лазер; A – аттенюатор; BS – светоделитель; PM – измеритель мощности; DM – дихроичное зеркало; MO – микрообъектив; S – образец на трехкоординатной моторизованной платформе; WLS – источник белого света; CL – конденсор; TL – тубусная линза; CAM – камера

и 100×, источником белого света и использованием скрещенных поляризаторов.

3. Исследование режимов модификации. В результате экспериментальных исследований было выявлено два типа модификации сапфира фемтосекундными лазерными импульсами; соответствующие этим режимам диапазоны E и t показаны на рис. 2a. Режим I (начало модификации при $P > 0.4$ Вт или $E > 5$ нДж) характеризуется относительно слабой ФЛ модифицированной области без визуально различимых признаков изменений в прошедшем свете. В режиме II под действием лазерных импульсов происходит повреждение материала, проявляющееся как локальное потемнение при белой подсветке без поляризаторов (рис. 2b) и как характерная цветная секторная картина от возникающих напряжений в скрещенных поляризаторах (рис. 2c), которое также сопровождается более сильной ФЛ (рис. 2d). Переходу между режимами соответствует $P \approx 1.8$ Вт или $E \approx 22.5$ нДж, при этом при $t > 8$ с (или $> 1.6 \times 10^8$ импульсов, указанный диапазон выделен зелеными прямоугольниками на рис. 2) модифицированные области демонстрируют как высокий уровень ФЛ, так и низкий уровень повреждений. Такое сочетание характеристик делает переходный режим перспективным для записи фотолюминесцентных меток, однако, как показали дальнейшие эксперименты с записью больших массивов при одинаковых параметрах, стабильность получаемых характеристик невысока.

Спектры ФЛ центральных частей модифицированных областей в режимах I и II в сравнении с ФЛ исходного материала приведены на рис. 3 для $\lambda_p = 405$ нм и $\lambda_p = 532$ нм. В всех случаях в спектрах присутствует дублет R_1, R_2 линий (692.7 и 694.2 нм) вместе с набором N-линий и боковых полос (660–675 и 705–720 нм) примесных ионов Cr^{3+} (в позиции замещения Al^{3+}) [36, 37]. При модификации в режиме I в спектре для $\lambda_p = 532$ нм появляется широкая полоса ФЛ с центром около 780–800 нм (1.55–1.6 эВ). Интегральная интенсивность ФЛ в этом спектральном диапазоне (показан желтым на рис. 3) была использована для визуализации ФЛ (рис. 2d) и сравнения интенсивности далее. В режиме II интенсивность ФЛ в этой полосе значительно усиливается и дополнительно возникают широкие полосы с центрами ≈ 490 нм (2.5 эВ, при $\lambda_p = 405$ нм) и ≈ 560 нм (2.2 эВ, при обеих λ_p). Наблюдаемые явления могут быть связаны с увеличением концентрации анионных вакансий вследствие облучения и локального повышения температуры и их объединением в F_2 и F_2^{2+}-центры (две рядом стоящие кислородные вакансии с различным числом электронов), которым соответствуют полосы ФЛ с центрами 2.2 и 2.5 эВ [38, 39] и, возможно, широкая полоса с центром ≈ 830 нм [40, 41]. Кроме того, рост интенсивности ФЛ боковых полос 705–720 нм и широкой полосы 750–780 нм возможен из-за увеличения числа групп из двух и более ионов Cr^{3+} [42], а также образования ранее неизученных комплексов из Cr^{3+} и вакансий, подобно комплексам из двух вакансий и двух ионов Mg^{2+} в кристаллах синтетического сапфира, легированных углеродом и магнием: $F_2^{2+}(2\,Mg)$ с ФЛ ≈ 520 нм и $F_2^{+}(2\,Mg)$ с ФЛ ≈ 750 нм [31].

4. Оценка характеристик модифицированных областей. Для определения зависимости размеров и других характеристик модифицированных областей был выполнен анализ трехмерных карт ФЛ

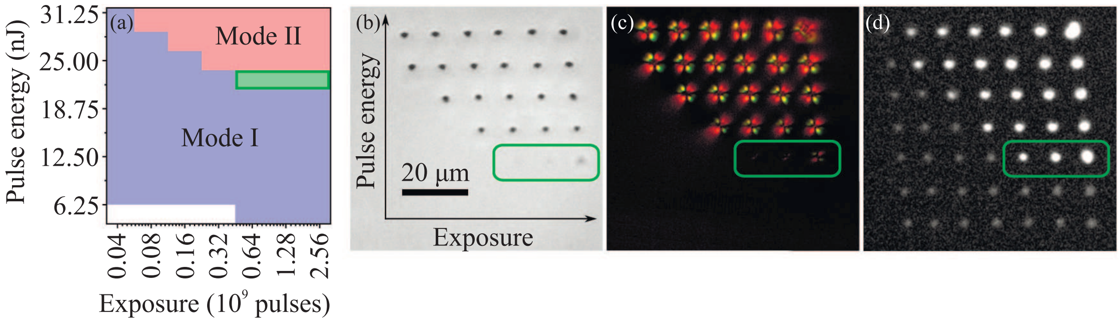

Рис. 2. (Цветной онлайн) Карта режимов модификации сапфира фемтосекундными лазерными импульсами в зависимости от мощности и продолжительности воздействия (a) и примеры микроскопических изображений модифицированных областей, использованных для ее построения: при белой подсветке без поляризаторов (b) и со скрещенными поляризаторами (c), ФЛ в диапазоне 760–780 нм при возбуждении излучением с длиной волны 532 нм (d). Диапазон параметров и модифицированные области, соответствующие переходному режиму, выделены зелеными прямоугольниками

массивов меток, записанных при различных E и t на глубине ≈ 70 мкм (пример одного слоя такой карты показан на рис. 2d). Максимальная интенсивность ФЛ достигается в центральной части метки и монотонно увеличивается с ростом E и t как при больших значениях E (режим II, рис. 4a), так и при малых (режим I, рис. 4d). Продольный размер (FWHM, ширина на уровне 0.5 от максимума) меток, определенный по соответствующим профилям интенсивности ФЛ (вдоль направления распространения лазерного излучения, рис. 4b, e), изменяется от 25 до 45 мкм с увеличением E и t для режима II и от 25 до 37 мкм для режима I. Аналогично, поперечный размер (рис. 4c, f) изменяется от 2 до 3.3 мкм (режим II) и от 1.8 до 2.3 мкм (режим I). Таким образом, за исключением максимальных значений параметров $E > 30$ нДж и $t > 16$ с ($> 1.28 \times 10^9$ импульсов), размеры меток в режимах I и II отличаются незначительно. При полученных размерах $2 \times 2 \times 25$ мкм^3 для фотолюминесцентного вокселя, кодирующего один бит, достижимая информационная емкость носителя на основе сапфира составит 25 Мбит/см^2 в слое и до 10 Гбит/см^3 при объемной записи. При данной оценке принято, что запись вокселей производится в режиме, не приводящем к возникновению напряжений в материале, и что отношение сигнал/шум при считывании является достаточным для надежного различения двух уровней сигнала (0/1) при изменении интенсивности ФЛ на 0.5 от максимума. Достижимая на практике объемная плотность записи зависит от характеристик устройства считывания и может быть ниже при ограничении на максимальное количество слоев, вызванном перекрестными помехами и снижением пропускания.

Повышение плотности записи возможно в первую очередь за счет сокращения продольного размера модифицируемой области, который определяется следующими факторами: длиной Рэлея ($\approx$1 мкм для $\lambda_w = 525$ нм, $n \approx 1.77$ и NA $= 0.55$), двулучепреломлением (разница в показателе преломления для ортогональных направлений поляризации $\Delta n < 0.01$ приводит к разнице в положении фокуса менее 1 мкм при глубине записи до 200 мкм), продольной сферической аберрацией из-за преломления на границе воздух-сапфир (≈ 3 мкм и ≈ 10 мкм для глубин записи 70 и 200 мкм соответственно) и нелинейным поглощением вблизи фокальной области. Также следует учесть, что размер вокселя был определен по интенсивности ФЛ при помощи конфокального микроскопа с продольным разрешением ~ 10 мкм (с учетом продольной сферической аберрации), которое в данном случае соответствует разрешению при считывании меток.

5. Запись бинарного кода. С целью демонстрации возможности использования фотолюминесцентных меток для хранения информации на различной глубине в диапазоне 50–250 мкм были записаны и затем считаны фрагменты бинарного кода. Примеры изображений таких кодов для глубины ≈ 70 мкм и экспозиции $t = 8$ с (1.6×10^8 импульсов) приведены для режима II ($E = 25$ нДж, рис. 5a, d), переходного режима ($E = 22.5$ нДж, рис. 5b, e) и режима I ($E = 20$ нДж, рис. 5c, f). Разброс максимальных значений интенсивности ФЛ меток в диапазоне 760–780 нм составил менее 10 % для режима I и менее 20 % для режима II; в обоих случаях все коды были считаны без ошибок. В переходном режиме даже при записи слоя на одной глубине при одинаковых параметрах случайным образом создаются метки трех

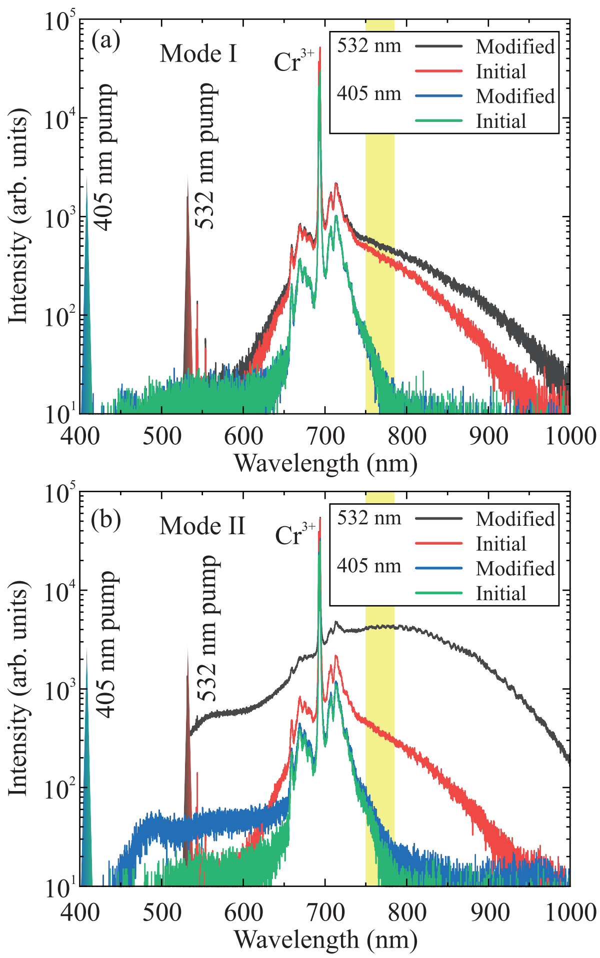

Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектры излучения модифицированных и немодифицированных областей в режиме I (a) и режиме II (b) при возбуждении на длинах волн 532 и 405 нм. Желтым выделен спектральный диапазон 760–780 нм, использованный для оценки интенсивности ФЛ

типов: как в режиме I (слабая ФЛ), как в режиме II (сильная ФЛ, повреждение материала) и промежуточного типа (самая сильная ФЛ, минимальные повреждения). Очевидно, отличие в интенсивности ФЛ в несколько раз для меток различных типов создает проблемы при последовательном считывании и не позволяет использовать такой режим записи на практике вопреки привлекательности характеристик меток промежуточного типа. Кроме того, случайный характер порогового перехода между типами также затрудняет реализацию многобитовой записи в одном вокселе за счет градаций интенсивности ФЛ, в отличие от плавной зависимости от E в режиме I (рис. 4d).

Несмотря на меньшее отношение сигнал/шум, режим I представляется более предпочтительным для создания фотолюминесцентной оптической памяти, так как возникающие в режиме II повреждения материала не позволят достичь предельной плотности записи как в одном слое из-за возникающих напряжений, так и по количеству расположенных друг над другом слоев из-за снижения пропускания при считывании. При записи слоев на различной глубине создаваемая плотность энергии лазерного излучения вблизи фокуса меняется из-за поглощения и вносимых границей воздух-сапфир аберраций, из-за чего выбранные оптимальные параметры (E и t) требуют корректировки для сохранения стабильного уровня ФЛ. Для адаптивной коррекции сферической аберрации могут быть использованы схемы на основе деформируемых зеркал и пространственных модуляторов света (ПМС) [43], которые также позволяют реализовать параллельную лазерную модификацию большого числа элементов и, соответственно, значительно увеличить скорость записи [44]. Экспериментальное подтверждение достижимой плотности записи и оптимизация параметров (включая сокращение времени экспозиции) являются задачами для дальнейших исследований.

6. Механизмы формирования микроструктур. Для оценки условий формирования микробитов и структурной модификации сапфира в режиме I (облако центров окраски) и II (микрополость) были проведены дополнительные исследования фокусировки фемтосекундных лазерных импульсов (515 нм, 300 фс) при $\mathrm{NA} = 0.55$ с одноимпульсным кратерообразованием на поверхности сапфира и многофотонного нелинейного поглощения в его объеме. Обнаружено, что при таких параметрах $1/e$-радиус фокального пятна по интенсивности на поверхности составляет ≈ 0.75 мкм, а нелинейное пропускание в режиме z-сканирования [45] хорошо аппроксимируется трехфотонным поглощением с коэффициентом $\beta_3 = (2.5 \pm 0.5) \times 10^2$ см^3/ТВт^2 (для сравнения, $\beta_3 = (1.8 \pm 1.1) \times 10^2$ см^3/ТВт^2 в работе [46]) в приближении зонной щели 7.3 эВ [47], или четырехфотонным поглощением с коэффициентом $\beta_4 = (5 \pm 1) \times 10^3$ см^5/ТВт^3 в приближении зонной щели ≈ 9 эВ [48]. Тогда в области фокуса можно грубо – без учета отражения, поглощения и транспорта электрон-дырочной плазмы (ЭДП) – оценить плотность вложенной энергии и ЭДП на пороге режима I ($E_{\mathrm{I}} \approx 5$ нДж) только для трехфотонного ($\sim 10^4$ Дж/см^3 и $\sim 10^{22}$ э-д пар/см^3) и четырехфотонного ($\sim 10^6$ Дж/см^3 и $\sim 10^{24}$ э-д пар/см^3) поглощения. Однако, для реальных размеров микробитов ($1 \times 1 \times 20$ мкм^3 по полуширине – см. рис. 4e, f), учитывающих сверхбыстрый баллистический и диф-

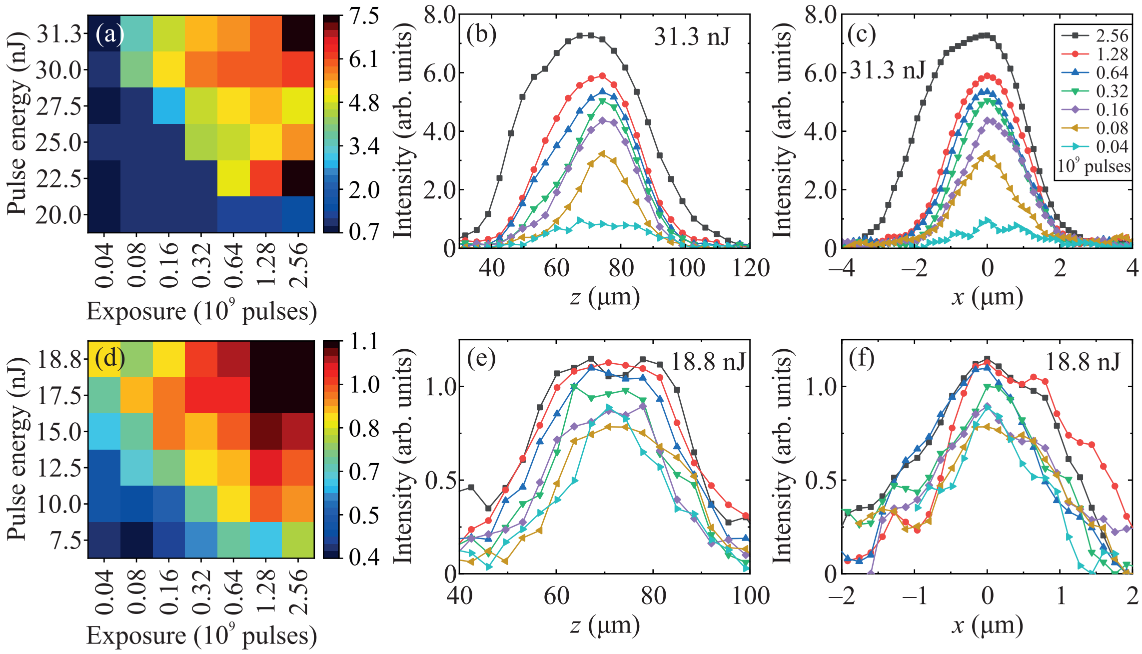

Рис. 4. (Цветной онлайн) Зависимости максимальной интенсивности ФЛ в диапазоне 760–780 нм от энергии модифицирующих лазерных импульсов и их количества (a), (d), а также продольные (b), (e) и поперечные (c), (f) профили интенсивности ФЛ модифицированных областей при высокой (a)–(c) и низкой (d)–(f) энергии импульсов. Профили интенсивности приведены для различного количества импульсов при энергии 31.3 нДж (b), (c) и 18.8 нДж (e), (f), цвет и тип маркеров указан на (c)

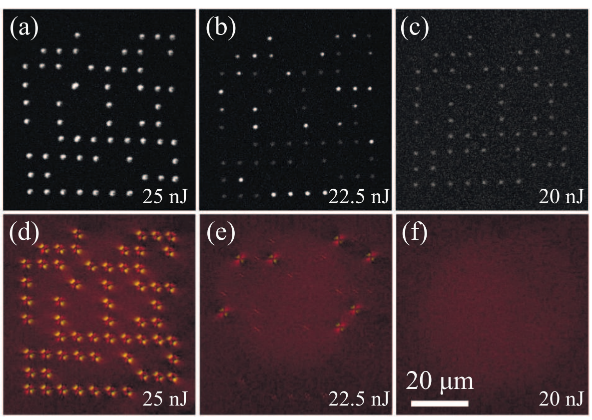

Рис. 5. (Цветной онлайн) Микроскопические изображения бинарного кода, записанного в режиме II (a), (d), переходном режиме (b), (e) и режиме I (c), (f): ФЛ в диапазоне 760–780 нм при накачке 532 нм (a)–(c) и пропускание при белой подсветке со скрещенными поляризаторами (d)–(f)

фузионный транспорт [16, 49], а также насыщение нелинейного поглощения вдоль направления распространения, плотность вложенной энергии и ЭДП на пороге режима I составляет более реалистичные значения $\sim 10^2$ Дж/см^3 и $\sim 10^{20}$ э-д пар/см^3, соответствующие многоимпульсному ($\sim 10^7$–10^9 импульсов в точку) накопительному режиму формирования центров окраски в многофотонном режиме поглощения. Аналогично, для режима II с пороговой энергией $E_{\mathrm{II}} \approx 25$ нДж формально получим аномальные значения для трехфотонного ($\sim 10^6$ Дж/см^3 и $\sim 10^{24}$ э-д пар/см^3) и четырехфотонного ($\sim 10^9$ Дж/см^3 и $\sim 10^{27}$ э-д пар/см^3) поглощения, но для реалистичных размеров микрополости – $\sim 10^3$–10^4 Дж/см^3 и $\sim 10^{21}$–10^{22} э-д пар/см^3 соответственно, что уже согласуется с существенным поглощением субкритической ЭДП (критическая плотность $\approx 4 \times 10^{21}$ э-д пар/см^3 для длины волны 515 нм) вдоль микробита, а также нагреванием и плавлением материала (6×10^3 Дж/см^3 [50]). В результате, в таком термическом режиме микрополость может формироваться в расплаве материала без абляции – путем образования микропузырька в центрированной волне разрежения [51], на что косвенно указывает фактическое отсутствие напряжений вблизи микробита в режиме I и переходном режиме на рис. 5. Использованная в нашей работе высокая частота следования лазерных импульсов (80 МГц) делает маловероятной образование протяженных областей аморфного материала из-за постоянной рекристаллизации [27] и способствует первичному образованию микрополости в ближней по направлению распространения излучения части микробита из-за экранирующего эффекта возникающей плазмы [28].

7. Заключение. В данной работе проведены исследования режимов модификации объема синтетического оптически прозрачного сапфира (α-Al_2O_3) под действием сфокусированных (NA = 0.55) фемтосекундных (150 фс) лазерных импульсов с длиной волны 525 нм. Было обнаружено два типа модификации (режим I, $E_{\rm I} < E < E_{\rm II}$, и режим II, $E > E_{\rm II}$) с пороговыми значениями энергии $E_{\rm I} \approx 5$ нДж и $E_{\rm II} \approx 25$ нДж. Оба типа модификации характеризуются ростом ФЛ в полосе 700–900 нм с максимумом 780–800 нм, связанным с увеличением концентрации вакансионных центров F_2 и F_2^{2+} и образованием сложных комплексов из двух и более ионов Cr^{3+} вследствие лазерного облучения. При этом режим II сопровождается формированием микрополости и видимыми повреждениями материала.

С использованием сканирующего конфокального микроскопа по профилям ФЛ измерены продольные и поперечные размеры сформированных меток, которые составляют в среднем $2 \times 2 \times 25$ мкм^3. Такие структуры могут использоваться в качестве одиночных элементов – вокселей – фотолюминесцентной оптической 2D- и 3D-памяти. Учитывая измеренный размер вокселя, потенциальная информационная емкость носителя информации на базе сапфира составляет более 10 Гбит/см^3. Отметим, что данная плотность записи достигается с микрообъективом NA = 0.55 и может быть увеличена за счет использования более острой фокусировки и адаптивной коррекции аберраций при изменении глубины записи.

Финансирование работы. Исследование выполнено в рамках государственного задания Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук # FFMR-2024-0009 и Института физики твердого тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук # FFWE-2022-0003.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. F. Chen and J. V. de Aldana, Laser Photonics Rev. **8**, 251 (2014).
2. Y. Shimotsuma, M. Sakakura, P. G. Kazansky, M. Beresna, J. Qiu, K. Miura, and J. Qiu, Adv. Mater. **22**, 5438 (2010).
3. A. Dostovalov, K. Bronnikov, V. Korolkov, S. Babin, E. Mitsai, A. Mironenko, M. Tutov, D. Zhang, K. Sugioka, J. Maksimovic, T. Katkus, S. Juodkazis, A. Zhizhchenko, and A. Kuchmizhak, Nanoscale **12**, 13431 (2020).
4. N. Skryabin, A. Kalinkin, I. Dyakonov, and S. Kulik, Micromachines **11**, 1 (2020).
5. D. Zayarny, JETP Lett. **103**, 309 (2016).
6. J. Zhang, M. Gecevičius, M. Beresna, and P. G. Kazansky, Phys. Rev. Lett. **112**, 033901 (2014).
7. Q.Wang, Y.-H. Lei, Y. Wang, Z.-T. Liu, Y.-H. Yu, X.-Q. Liu, B.-R. Gao, K.-M. Xu, and L. Wang, Opt. Express **32**, 46140 (2024).
8. S. Fedotov, A. Lipatiev, T. Lipateva, S. Lotarev, E. Mel'nikov, and V. Sigaev, J. Am. Ceram. Soc. **104**, 4297 (2021).
9. S. Kudryashov, P. Danilov, N. Smirnov, E. Kuzmin, A. Rupasov, R. Khmelnitsky, G. Krasin, I. Mushkarina, and A. Gorevoy, Micromachines **14**, 1300 (2023).
10. H. Wang, Y. Lei, L. Wang, M. Sakakura, Y. Yu, G. Shayeganrad, and P. G. Kazansky, Laser Photonics Rev. **16**, 2100563 (2022).
11. P. Anderson, E. Aranas, Y. Assaf et al. (Collaboration), ACM Transactions on Storage **21**, 1 (2025).
12. S. Fedotov, A. Okhrimchuk, A. Lipatiev, A. Stepko, K. Piyanzina, G. Y. Shakhgildyan, M. Y. Presniakov, I. Glebov, S. Lotarev, and V. Sigaev, Opt. Lett. **43**, 851 (2018).
13. A. Saini, C. Christenson, T. Khattab, R. Wang, R. Twieg, and K. Singer, J. Appl. Phys. **121**, 043101 (2017).
14. Z. Hu, X. Huang, Z. Yang, J. Qiu, Z. Song, J. Zhang, and G. Dong, Light Sci. Appl. **10**, 140 (2021).
15. X. Huang, Q. Guo, D. Yang, X. Xiao, X. Liu, Z. Xia, F. Fan, J. Qiu, and G. Dong, Nat. Photonics **14**, 82 (2020).
16. S. Kudryashov, P. Danilov, N. Smirnov et al. (Collaboration), Nanomaterials **13**, 192 (2023).
17. W. Cheng, Z. Wang, X. Liu, Y. Cheng, and P. Polynkin, Opt. Lett. **48**, 751 (2023).
18. R. Babunts, Y. A. Uspenskaya, A. Bundakova, G. Mamin, E. Mokhov, and P. Baranov, JETP Lett. **118**, 629 (2023).
19. G. Wang, H. Zuo, H. Zhang, Q. Wu, M. Zhang, X. He, Z. Hu, and L. Zhu, Mater. Des. **31**, 706 (2010).
20. V. Kurlov, in *Sapphire: Properties, Growth and Applications*, Pergamon, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK (2001), p. 8259.
21. G. Katyba, K. Zaytsev, I. Dolganova, I. Shikunova, N. Chernomyrdin, S. Yurchenko, G. Komandin, I. Reshetov, V. Nesvizhevsky, and V. Kurlov, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials **64**, 133 (2018).
22. S. Zhou, S. Yuan, Y. Liu, L. J. Guo, S. Liu, and H. Ding, Applied Surface Science **355**, 1013 (2015).
23. W. Wang, W. Yang, H. Wang, Y. Zhu, M. Yang, J. Gao, and G. Li, Vacuum **128**, 158 (2016).

24. G. Akselrod, M. Akselrod, E. Benton, and N. Yasuda, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **247**, 295 (2006).
25. H. Fan, M. Ryu, R. Honda, J. Morikawa, Z.-Z. Li, L. Wang, J. Maksimovic, S. Juodkazis, Q.-D. Chen, and H.-B. Sun, Nanomaterials **9**, 1414 (2019).
26. S. Xu, H. Fan, Z.-Z. Li, J.-G. Hua, Y.-H. Yu, L. Wang, Q.-D. Chen, and H.-B. Sun, Opt. Lett. **46**, 536 (2021).
27. S. Juodkazis, K. Nishimura, H. Misawa, T. Ebisui, R. Waki, S. Matsuo, and T. Okada, Adv. Mater. **18**, 1361 (2006).
28. L. Capuano, R. Tiggelaar, J. Berenschot, J. Gardeniers, and G. Römer, Optics and Lasers in Engineering **133**, 106114 (2020).
29. M. S. Akselrod, S. S. Orlov, G. M. Akselrod, G. J. Sykora, K. J. Dillin, and T. H. Underwood, in *Optical Data Storage 2007*, International Society for Optics and Photonics, ed. by B. Bell and T. Shimano, SPIE, Portland, OR, USA (2007), v. 6620, p. 662003.
30. B. D. Evans, G. J. Pogatshnik, and Y. Chen, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **91**, 258 (1994).
31. M. S. Akselrod, A. E. Akselrod, S. S. Orlov, S. Sanyal, and T. H. Underwood, Journal of Fluorescence **13**, 503 (2003).
32. T. Mohanty, N. Mishra, F. Singh, S. Bhat, and D. Kanjilal, Radiat. Meas. **36**, 723 (2003).
33. J. Ma, M. E. Thomas, P. McGuiggan, and J. B. Spicer, Opt. Eng. **59**, 087101 (2020).
34. W. Zhu and G. Pezzotti, Journal of Raman J. Raman Spectrosc. **42**, 2015 (2011).
35. D. T. M. Phan, T. Häger, and W. J. Raman Spectrosc. **48**, 453 (2017).
36. E. Yu. Zykova, K. E. Ozerova, A. A. Tatarintsev, and A. N. Turkin, Opt. Spectrosc. **130**, 1104 (2022).
37. C. Guguschev, J. Götze, and M. Göbbels, Am. Mineral. **95**, 449 (2010).
38. V. Kortov, V. Pustovarov, and T. Shtang, Radiat. Meas. **85**, 51 (2016).
39. S. V. Solov'ev, I. I. Milman, and A. I. Syurdo, Physics of the Solid State **54**, 726 (2012).
40. N. Lazareva, A. Rakevich, and E. Martynovich, Fundamental research **2** (part 12), 2585 (2015).
41. E. Martynovich, A. Tokarev, and V. Grigorov, Opt. Commun. **53**, 254 (1985).
42. T. Toyoda, T. Obikawa, and T. Shigenari, Materials Science and Engineering B **54**, 33 (1998).
43. R. D. Simmonds, P. S. Salter, A. Jesacher, and M. J. Booth, Opt. Express **19**, 24122 (2011).
44. P. S. Salter and M. J. Booth, Light: Light Sci. Appl. **8**, 110 (2019).
45. Y. S. Gulina, J. Zhu, A. V. Gorevoy, N. I. Dolzhenko, P. A. Danilov, E. N. Rimskaya, and S. I. Kudryashov, JETP Lett. **121**, 32 (2025).
46. M. Chen, J. Shao, Y. Zhao, G. Hu, M. Zhu, Y. Chai, K. Zhang, and H. Ma, Opt. Mater. Express **12**, 533 (2022).
47. A. Major, F. Yoshino, I. Nikolakakos, J. Aitchison, and P. Smith, Opt. Lett. **29**, 602 (2004).
48. W. J. Gignac, R. S. Williams, and S. P. Kowalczyk, Phys. Rev. B **32**, 1237 (1985).
49. N. Smirnov, S. Kudryashov, A. Rudenko, D. Zayarny, and A. Ionin, Applied Surface Science **562**, 150243 (2021).
50. *Физические величины: справочник*, под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова, Энергоатомиздат, М. (1991).
51. A. Vogel, J. Noack, G. Hüttmann, and G. Paltauf, Applied Physics B **81**, 1015 (2005).