Формирование и сравнение оптических свойств локализованных излучателей на основе монослоев дихалькогенидов переходных металлов, полученных методом локальной деформации зондом атомно-силового микроскопа

© Е.В. Неклюдов[1], А.Н. Абрамов[1], Э. Моисеев[2], Э. Чиглинцев[3], В.А. Кравцов[1]

[1] Национальный исследовательский университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия
[2] Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
190008 Санкт-Петербург, Россия
[3] Московский физико-технический институт,
141707 Москва, Россия

E-mail: egor.nekliudov@metalab.ifmo.ru

Поступила в Редакцию 10 августа 2026 г.
В окончательной редакции 1 сентября 2026 г.
Принята к публикации 1 сентября 2026 г.

Представлены результаты экспериментального исследования увеличения эффективности излучения локализованных источников света на основе монослоев WSe_2, полученных методом локальной деформации зондом атомно-силового микроскопа, за счет взаимодействия излучателей с гладким слоем золота толщиной 40 нм (эффект Парселла). Анализ временно-разрешенных и мощностных характеристик показывает, что наличие золотой поверхности приводит к уменьшению мощности насыщения и приблизительно двукратному сокращению времени затухания фотолюминесценции локализованных источников света.

Ключевые слова: источники одиночных фотонов, монослои дихалькогенидов переходных металлов, атомно-силовая микроскопия.

DOI: 10.61011/FTP.2026.10.64213.10183

1. Введение

Разработка однофотонных излучателей является актуальной задачей, поскольку такие источники света являются одним из важных компонентов перспективных устройств в области квантовых вычислений и коммуникаций [1,2].

Ранее однофотонные источники были реализованы на основе многих платформ и материалов: наночастицы [3], ридберговские атомы [4], дефекты и примеси в алмазах [5], квазидвумерные кристаллы [6–8]. В данной работе излучатели были сформированы на основе монослоев WSe_2 методом локальной деформации зондом АСМ (атомно-силового микроскопа) [6–8], что перспективно для интеграции с нанофотонными структурами [2]. Преимуществами данного метода являются управление величиной деформации монослоя и контроль расположения излучателей на чипе.

Ключевой параметр однофотонных излучателей — яркость (число фотонов в единицу времени), определяющая скорость передачи данных. Яркость может быть повышена благодаря эффекту Парселла — изменению излучательной способности источника света за счет взаимодействия с окружающей средой, например с резонатором [9,10].

В данной работе исследовалась возможность усиления излучения за счет взаимодействия с металлической поверхностью. Для этого были изучены оптические свойства локализованных излучателей на основе монослоев WSe_2, интегрированных с золотым зеркалом. Такая геометрия может стать первым шагом к разработке сложных резонаторов, которые могут значительно увеличивать яркость однофотонных излучателей.

Монослои WSe_2 (HQ Graphene) были получены методом механической эксфолиации и перенесены на подложку ПДМС (полидиметилсилоксан)/стекло методом сухого трансфера. Монослои WSe_2 идентифицировались среди кристаллов по сигналу фотолюминесценции [11]. Полученные монослои WSe_2 переносились на предварительно подготовленные подложки 950 PMMA (полиметилметакрилат)/Au/SiO_2(1000 нм)/Si либо на подложки PMMA/SiO_2/Si. Структуры без золота использовались в качестве контрольных образцов. Слой золота (Au 40 нм) наносился на подложку SiO_2(1000 нм)/Si методом термического напыления в вакуумной камере MBraun на поверхность SiO_2/Si с подслоем хрома 5 нм для улучшения адгезии. Слой PMMA был нанесен методом центрифугирования (2000–2200 оборотов/мин) с последующим отжигом при 180 °C (1–2 мин). Для формирования излучателей монослои WSe_2 локально деформировались зондом АСМ (рис. 1). Для деформации использовался затупленный фокусированным ионным пучком зонд АСМ, что позволило предотвратить разрыв монослоя WSe_2 острием зонда. Расстояние между соседними углублениями составляло от 5 до 7 мкм (рис. 2, *a*), латеральный размер

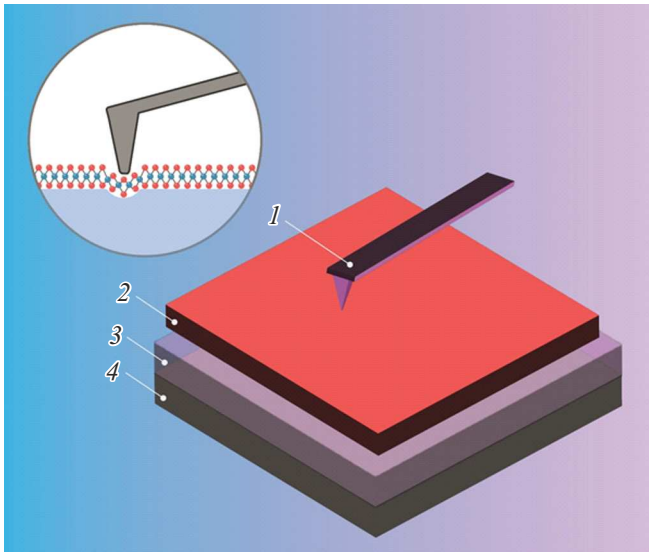

Рис. 1. Схема продавливания монослоев зондом АСМ. Элементы схемы: *1* — зонд АСМ, *2* — монослой, *3* — слой PMMA, *4* — твердая подложка.

углублений —- от 300 до 500 нм (рис. 2, *b*), глубина деформированных участков — от 80 до 200 нм (рис. 2, *c*). Геометрия обоих образцов изображена на рис. 3, *a*.

Стоит отметить, что величина эффекта Парселла зависит от расстояния между излучателем и металлической поверхностью. В данной работе это расстояние контролировалось путем изменения толщины слоя PMMA при изготовлении подложек. Путем численного расчета интерференции исходящих от излучателя лучей с золотой поверхностью в диэлектрической среде было получено, что при толщине слоя PMMA 300 нм наблюдается второй максимум интерференции. Рассчитанный первый максимум интерференции соответствует толщине слоя PMMA 85 нм, однако такая толщина неприменима для метода локальной деформации зондом АСМ. Кроме того, при чрезмерном уменьшении расстояния между излучателем и металлической поверхностью возрастает вклад безызлучательной передачи энергии в металл, что может приводить к гашению фотолюминесценции [12].

Оптические свойства полученных структур исследовались методом спектроскопии фотолюминесценции. Для получения спектров фотолюминесценции излучателей применялся спектрометр Princeton Instruments Acton

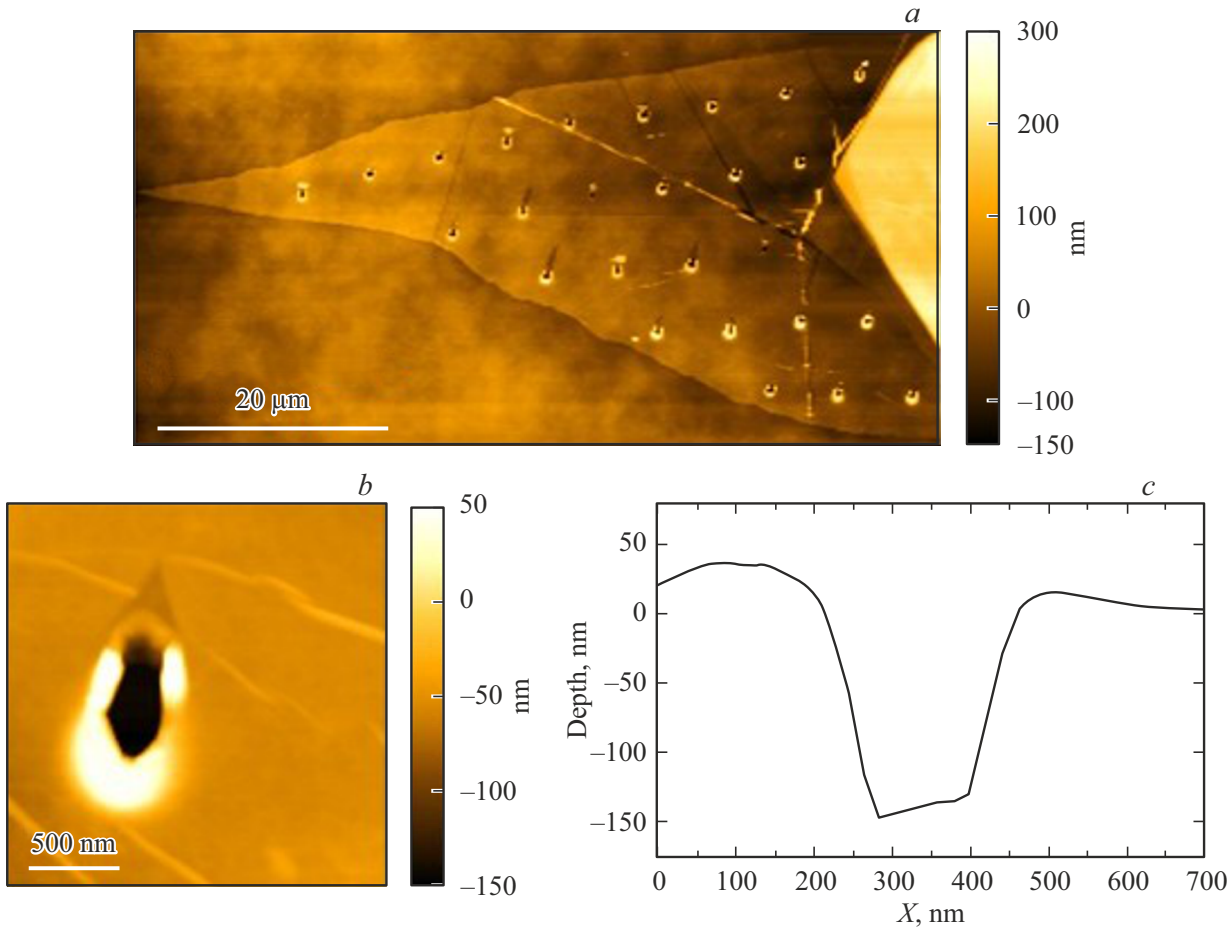

Рис. 2. *a* — АСМ-изображение монослоя WSe_2 со сформированными на нем наноуглублениями; *b* — АСМ-изображение одного из углублений, сформированных зондом АСМ; *c* — профиль углубления, сформированного зондом АСМ.

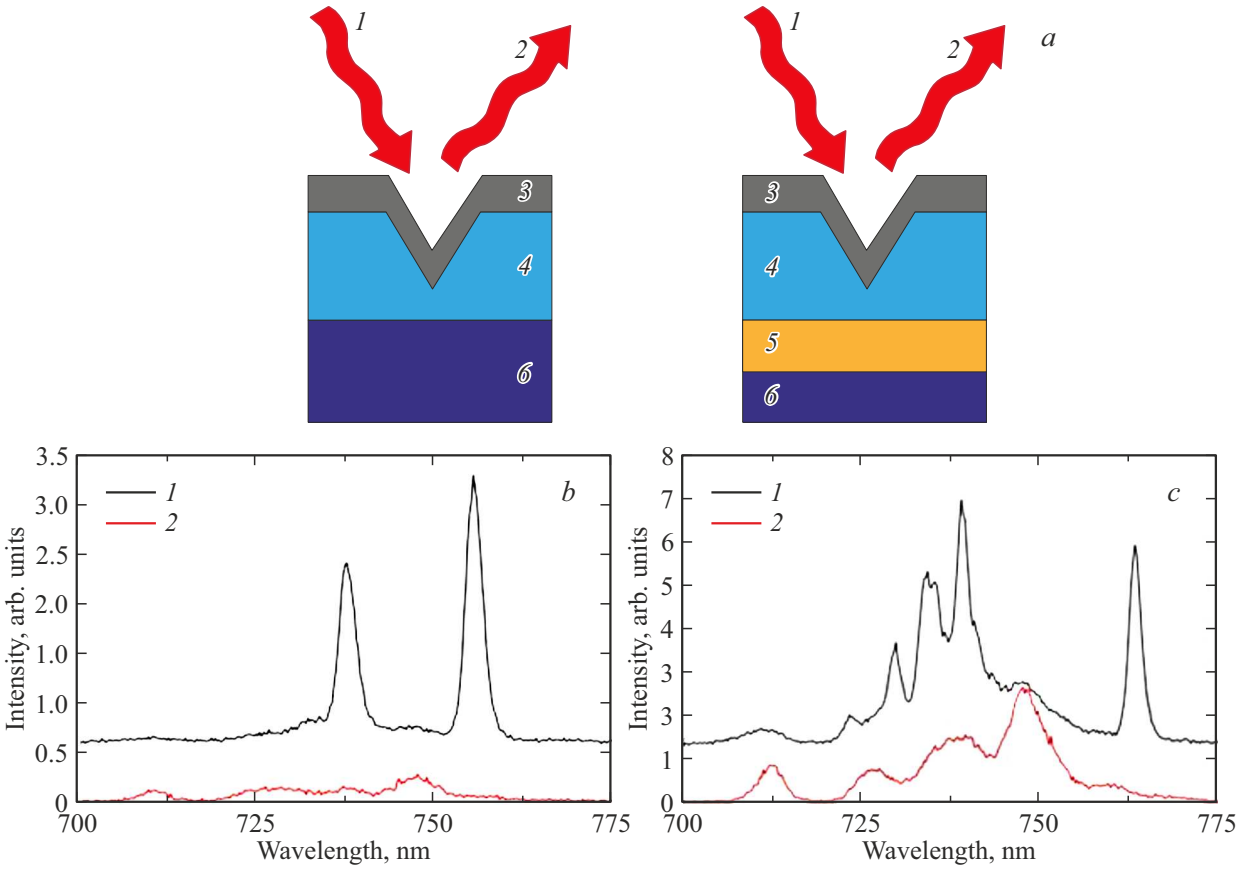

Рис. 3. *a* — геометрия исследуемых образцов на подложках WSe_2/PMMA/SiO_2/Si (слева) и WSe_2/PMMA/Au/SiO_2/Si (справа): *1* — излучение лазера накачки, *2* — излучение полученного источника света, *3* — монослой WSe_2, *4* — слой PMMA (300 нм), *5* — слой Au (40 нм), *6* — подложка SiO_2(1000 нм)/Si; *b* — полученные спектры образцов WSe_2/PMMA/SiO_2/Si: *1* — спектр локализованного излучателя вблизи области локальной деформации, *2* — спектр недеформированного участка монослоя; *c* — полученные спектры образцов WSe_2/PMMA/Au/SiO_2/Si: *1* — спектр локализованного излучателя вблизи области локальной деформации, *2* — спектр недеформированного участка монослоя.

SP-2500 с дифракционной решеткой 150 штрихов/мм и охлаждаемой жидким азотом CCD-камерой. Образцы находились в гелиевом криостате при температуре 10 K. Излучатели возбуждались гелий-неоновым лазером (632.8 нм) с мощностью 0.1–3 мкВт (что соответствовало плотности мощности 33–990 Вт/см^2). Фокусировка лазерного излучения производилась объективом с численной апертурой NA = 0.65. Диаметр пятна в фокусе, рассчитанный для гауссова пучка по уровню $1/e^2$, составил 620 нм, плотность мощности при 1 мкВ составила $\sim$ 330 Вт/см^2. Характерные спектры для выбранных локализованных излучателей в области локальной деформации монослоя WSe_2 представлены на рис. 3, *b* (PMMA/SiO_2/Si) и 3, *c* (PMMA/Au/SiO_2/Si). На полученных спектрах наблюдаются пики излучения в диапазоне от 730 до 830 нм.

Формирование локализованных излучателей обусловлено двумя факторами: наличием точечных дефектов в монослое WSe_2 и созданной локальной механической деформацией, модулирующей зонную структуру материала. Локальная деформация создает потенциальные ямы для экситонов, способствует их гибридизации с атомарными дефектами, вследствие чего возникает эмиссия. Сложная многокомпонентная форма спектров (рис. 3, *b* и *c*), вероятно, обусловлена наличием нескольких типов дефектных центров в монослоях WSe_2 [13]. Положение и количество дополнительных пиков варьируется от излучателя к излучателю, что отражает неоднородное распределение дефектов в монослое и различную величину деформации в каждом излучателе. Различия между спектрами образцов на подложках PMMA/SiO_2/Si и PMMA/Au/SiO_2/Si связаны с влиянием золотого зеркала на излучательную способность дефектных центров: золото модифицирует локальную плотность фотонных состояний вблизи излучателя (эффект Парселла), что может изменять соотношение между излучательной и безызлучательной скоростями рекомбинации для различных дефектных переходов и приводить к изменению распределения интенсивностей между пиками.

Для выбранных излучателей и для основного экситона монослоя WSe_2 (710 нм) были измерены зависимости интенсивности от мощности. Для экситонов (рис. 4, *b*)

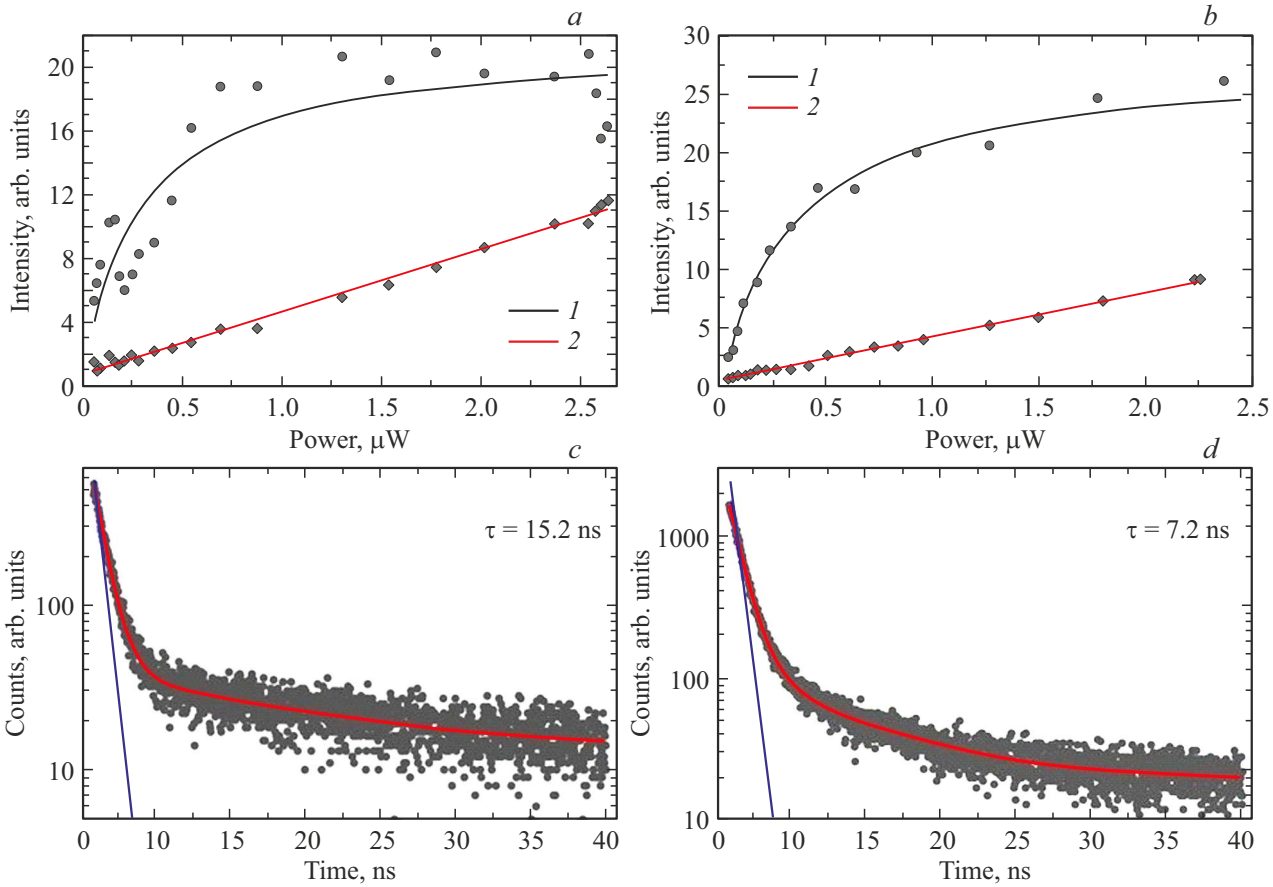

Рис. 4. *a* — характерная зависимость интенсивности от мощности накачки лазера для образца $WSe_2/PMMA/SiO_2/Si$: *1* — для локализованного излучателя, *2* — для экситона ($\lambda = 710$ нм). P_{sat} равна 0.27 мкВт; *b* — характерная зависимость интенсивности от мощности накачки лазера для образца $WSe_2/PMMA/Au/SiO_2/Si$: *1* — для локализованного излучателя, *2* — для экситона. P_{sat} равна 0.2 мкВт; *c* —- характерный вид зависимости времени жизни излучателя для образца $WSe_2/PMMA/SiO_2/Si$. Синей линией обозначена инструментальная функция лазера; *d* — характерный вид зависимости времени жизни излучателя для образца $WSe_2/PMMA/Au/SiO_2/Si$. Синей линией обозначена инструментальная функция лазера.

наблюдалась линейная зависимость интенсивности от мощности накачки, для локализованных излучателей — сублинейная зависимость с насыщением (рис. 4, *a* и *b*). Для описания насыщения использовалась модель двухуровневой системы [14], в которой зависимость интенсивности люминесценции от мощности имеет вид

$$I = \frac{I_{max} P}{P + P_{sat}},$$

где I — интенсивность пика на спектре, P — мощность накачки лазера, I_{max} и P_{sat} — параметры аппроксимации, I_{max} имеет физический смысл интенсивности излучателя при бесконечной мощности накачки лазера, а P_{sat} — мощности насыщения (P, при котором $I = I_{max}/2$). Переход в нелинейный по мощности накачки режим обусловлен кинетическим насыщением конечного числа эмиссионных состояний. Для образцов на подложке $PMMA/SiO_2/Si$ средняя мощность насыщения P_{sat} составила 2.57 ± 1.75 мкВт на основе измерения для 9 излучателей, а для образцов на подложке $PMMA/Au/SiO_2/Si$ — 1.47 ± 0.64 мкВт на основе измерения для 21 излучателя (табл. 1). Следует отметить, что более универсальной характеристикой является плотность мощности возбуждения (в данной работе — 330 Вт/см^2 при 1 мкВт), учитывающая размер пятна фокусировки. Отношение средних плотностей мощности насыщения излучателей на подложках $PMMA/Au/SiO_2/Si$ и $PMMA/SiO_2/Si$ составляет 1.75. Уменьшение мощности насыщения в присутствии золотой поверхности может быть связано как с изменением динамики рекомбинации локализованных состояний, так и с изменением эффективности их возбуждения.

Для непосредственного исследования динамики рекомбинации были проведены временно-разрешенные измерения фотолюминесценции. Времена затухания фотолюминесценции были измерены при возбуждении импульсным суперконтинуумным лазером (длина волны — 633 нм, мощность $\sim P_{sat}$). Сигнал фильтровался монохроматором и детектировался однофотонным детектором (рис. 4, *c* и *d*). Полученные зависимости были

Таблица 1. Результаты измерения мощностей насыщения для образцов на подложках PMMA/SiO_2/Si и PMMA/Au/SiO_2/Si

	Излучатели на подложках PMMA/SiO_2/Si	Излучатели на подложках PMMA/Au/SiO_2/Si
Средняя мощность насыщения P_{sat}, мкВт	2.57 ± 1.75	1.47 ± 0.64
Среднеквадратическое отклонение мощности насыщения, мкВт	2.27	1.4
Средняя плотность мощности насыщения ρ_{sat}, Вт/см^2	853 ± 581	488 ± 212
Среднеквадратическое отклонение плотности мощности насыщения, Вт/см^2	754	466
Число точек в выборке	9	21

Таблица 2. Результаты измерения времен жизни для образцов на подложках PMMA/SiO_2/Si и PMMA/Au/SiO_2/Si

	Излучатели на подложках PMMA/SiO_2/Si	Излучатели на подложках PMMA/Au/SiO_2/Si
Среднее время затухания люминесценции τ, нс	17 ± 15.7	8.63 ± 2.55
Среднеквадратическое отклонение времени затухания люминесценции, нс	9.86	2.43
Число точек в выборке	4	6

аппроксимированы функцией вида

$$Y = A_1 + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_3 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right),$$

где большее из двух времен τ_1 и τ_2 является временем затухания фотолюминесценции излучателя, а меньшее обусловлено инструментальным откликом, A_1 — фоновый сигнал, A_2 и A_3 — предэкспоненциальные коэффициенты; τ_1, τ_2, A_1, A_2 и A_3 — параметры аппроксимации. Среднее время затухания люминесценции на подложках PMMA/SiO_2/Si составило 17 ± 15.7 нс на основе измерений для 4 излучателей, а на подложках PMMA/Au/SiO_2/Si — 8.63 ± 2.55 нс на основе измерений для 6 излучателей. Отношение средних времен затухания фотолюминесценции излучателей на подложках PMMA/SiO_2/Si и PMMA/Au/SiO_2/Si составляет 1.97 (табл. 2). При условии сопоставимого вклада безызлучательных каналов рекомбинации это значение может рассматриваться как оценка фактора Парселла [10].

Значения в табл. 1 и 2 представлены в виде среднего арифметического $\pm 95\,\%$-ный доверительный интервал для среднего. Большая ширина доверительных интервалов для излучателей на подложках PMMA/SiO_2/Si обусловлена малым объемом выборки, а также значительным разбросом характеристик отдельных локализованных излучателей. Такой разброс может быть связан с неоднородностью локальной деформации и микроскопического дефектного окружения различных излучателей.

Таким образом, в данной работе было изучено влияние золотой поверхности на мощностные и временны́е характеристики полученных излучателей. Средняя мощность насыщения уменьшилась с 2.57 до 1.47 мкВт, а среднее время затухания фотолюминесценции — с 17.0 до 8.63 нс. Отношение средних времен затухания составляет ~ 1.97, что указывает на почти двукратное увеличение суммарной скорости рекомбинации излучателей в присутствии золотого зеркала. В рамках рассматриваемой геометрии рассчитанное усиление, обусловленное взаимодействием с плоским отражателем, достигает значений порядка двух [12], что также качественно согласуется с экспериментально наблюдаемым изменением временны́х характеристик. Дальнейшее увеличение скорости излучательной рекомбинации и яркости локализованных излучателей может быть достигнуто путем их интеграции с резонансными нанофотонными структурами. Результаты, приведенные в этой работе, могут служить основой для разработки таких резонаторов, значительно увеличивающих характеристики излучателей.

Финансирование работы

Данное исследование было профинансировано грантом Российского Научного Фонда № 25-22-20038 и грантом Санкт-Петербургского Научного Фонда № 25-22-20038.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] I. Aharonovich, D. Englund, M. Toth. Nature Photonics, **10** (10), 631 (2016). DOI: 10.1038/nphoton.2016.186
[2] J. Lee, V. Leong, D. Kalashnikov, J. Dai, A. Gandhi, L.A. Krivitsky. AVS Quant. Sci., **2** (3), 031701 (2020). DOI: 10.1116/5.0011316
[3] L. Sapienza, M. Davanço, A. Badolato, K. Srinivasan. Nature Commun., **6** (1), 7833 (2015). DOI: 10.1038/ncomms8833
[4] S. Shi, B. Xu, K. Zhang, G.S. Ye, D.S. Xiang, Y. Liu, J. Wang, D. Su, L. Li. Nature Commun., **13** (1), 4454 (2022). DOI: 10.1038/s41467-022-32083-9
[5] S. Ditalia Tchernij, T. Lühmann, T. Herzig, J. Küpper, A. Damin, S. Santonocito, M. Signorile, P. Traina, E. Moreva, F. Celegato, S. Pezzagna, I.P. Degiovanni, P. Olivero, M. Jakšić, J. Meijer, P.M. Genovese, J. Forneris. ACS Photonics, **5** (12), 4864 (2018). DOI: 10.1021/acsphotonics.8b01013
[6] A.N. Abramov, I.Y. Chestnov, E.S. Alimova, T. Ivanova, I.S. Mukhin, D.N. Krizhanovskii, I.A. Shelykh, I.V. Iorsh, V.A. Kravtsov. Nature Commun., **14** (1), 5737 (2023). DOI: 10.1038/s41467-023-41292-9
[7] M.R. Rosenberger, C.K. Dass, H.J. Chuang, S.V. Sivaram, K.M. McCreary, J.R. Hendrickson, B.T. Jonker. ACS Nano, **13** (1), 904 (2019). DOI: 10.1021/acsnano.8b08730
[8] C.E. Stevens, H.J. Chuang, M.R. Rosenberger, K.M. McCreary, C.K. Dass, B.T. Jonker, J.R. Hendrickson. ACS Nano, **16** (12), 20956 (2022). DOI: 10.1021/acsnano.2c08553
[9] B. Lefaucher. *Cavity quantum electrodynamics with silicon color centers: from ensembles to a single photon source* (Universit. Grenoble Alpes, 2024). DOI: 10.70675/5e7a5659z9774z4830z9567z1f7b39f010dd
[10] M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, A.N. Poddubny, G. Khitrova. Phys. Solid State, **53** (9), 1753 (2011). DOI: 10.1134/S1063783411090125
[11] S. Shree, I. Paradisanos, X. Marie, C. Robert, B. Urbaszek. Nature Rev. Phys., **3** (1), 39 (2021). DOI: 10.1038/s42254-020-00259-1
[12] M. Agio. *Molecular scattering and fluorescence in strongly confined optical fields: spectroscopy, sensing and signal processing: habilitation thesis* (Zurich, 2011). DOI: 10.3929/ethz-a-007049705
[13] S. Ding, F. Lin, C. Jin. Nanotechnology, **32** (25), 255701 (2021). DOI: 10.1088/1361-6528/abeeb2
[14] G. Grosso, H. Moon, B. Lienhard, S. Ali, D.K. Efetov, M.M. Furchi, P. Jarillo-Herrero, M.J. Ford, I. Aharonovich, D. Englund. Nature Commun., **8** (1), 705 (2017). DOI: 10.1038/s41467-017-00810-2

Редактор Г.А. Оганесян

Formation and comparison of the optical properties of localized emitters based on monolayers of transition metal dichalcogenides obtained by local deformation with an atomic force microscope probe

E.V. Nekliudov[1], *A.N. Abramov*[1], *E. Moiseev*[2], *E. Chiglintsev*[3], *V.A. Kravtsov*[1]

[1] ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia
[2] HSE University,
190008 St. Petersburg, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology,
141707 Moscow, Russia

Abstract The results of an experimental study on enhancing the emission efficiency of localized light sources based on WSe_2 monolayers obtained by local deformation with an atomic force microscope probe, through the interaction of the emitters with a smooth 40-nm-thick gold layer (Purcell effect), are presented. Analysis of time-resolved and power-dependent characteristics shows that the presence of the gold surface leads to a decrease in the saturation power and an approximately twofold reduction in the photoluminescence decay time of the localized light sources.