

Лазерная печать алмазных наночастиц с люминесцирующими центрами кремний–вакансия

М.С. Комленок¹, О.С. Кудрявцев¹, Д.Г. Пастернак¹, И.И. Власов¹, В.И. Конов¹

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Аннотация

Продемонстрирована возможность лазерной печати одиночных алмазных наночастиц с люминесцирующими SiV-центрами. Для осуществления переноса мишень, состоящая из прозрачной сапфировой пластины и поглощающей тонкой пленки титана (толщиной 600 нм), покрытой наночастицами, облучалась эксимерным лазером KrF ($\lambda=248$ нм, $\tau=20$ нс). Определены оптимальные значения плотности энергии лазерного излучения, и разработана система нанесения меток для адресного переноса наночастиц. Люминесцентное картирование мишени и приёмной подложки подтвердило перенос наночастиц алмаза с SiV-центрами.

Ключевые слова: нанофотоника и оптика наноструктур, лазерная печать, алмазные наночастицы, SiV-центры, эксимерные лазеры.

Цитирование: Комленок, М.С. Лазерная печать алмазных наночастиц с люминесцирующими центрами кремний–вакансия / М.С. Комленок, О.С. Кудрявцев, Д.Г. Пастернак, И.И. Власов, В.И. Конов // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 6. – С. 860-864. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-918.

Citation: Komlenok MS, Kudryavtsev OS, Pasternak DG, Vlasov II, Konov VI. Laser printing of diamond nanoparticles with luminescent SiV centers. Computer Optics 2021; 45(6): 860-864. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-918.

Введение

Люминесцирующие алмазные наночастицы являются привлекательным материалом для квантовой оптики [1–3], что обусловлено перспективами создания источников одиночных фотонов (ИОФ) на их основе, т.к. одиночные центры окраски (NV, SiV) демонстрируют стабильную и интенсивную фотолюминесценцию при комнатной температуре [4–7]. Существуют два основных подхода для формирования заданной архитектуры ИОФ в алмазах: (1) одиночный эмиттер или их массив формируется в объемном кристалле алмаза; (2) один эмиттер формируется в отдельном нанокристалле алмаза. Недостатками первого метода являются сложность в получении ИОФ в заданном месте, если, например, ИОФ формируется путем легирования алмаза примесными атомами в процессе его синтеза, а также в невозможности модификации однажды созданной конструкции, как, например, в случае лазерноиндуцированного воздействия [8–10]. Второй подход является более перспективным, так как дает возможность свободно ориентировать наночастицы в пространстве и формировать массивы однофотонных эмиттеров любой необходимой конфигурации. Упорядоченные структуры наноалмазов формируются обычно в два этапа. Сначала с помощью центрифугирования или капельной методики частицы хаотично наносятся на рабочую поверхность подложки. Затем осуществляется постселекция алмазных наночастиц и постобработка структуры с помощью наноманипуляций. Для нано-

манипуляций в основном используется метод ‘pickandplace’, согласно которому предварительно отобранные с помощью, например, конфокального микроскопа наночастицы отрываются от подложки, переносятся на выбранную структуру и затем прикрепляются в новом положении [11–13]. В качестве инструмента для наноманипуляций в большинстве случаев используют иглу зонда сканирующего зондового микроскопа (СЗМ). Однако количество удачных манипуляций составляет в этом методе приблизительно 1/3 от общего числа попыток из-за того, что наноалмаз часто не прилипает к игле или же прилипает к ее торцу и становится неопознанным в ходе первоначального и последующего скана [14]. Альтернативным вариантом наноманипуляции является метод ‘pushing’. В этом случае игла СЗМ прижимается к поверхности подложки, приводится в непрерывный контакт с наночастицей и толкает ее по поверхности образца из одного положения в другое [15]. Несмотря на успешность продемонстрированных подходов, основным их недостатком является ограниченность дистанции, на которой можно манипулировать алмазными наночастицами. Предлагаемый нами метод лазерной печати лишён указанного недостатка и позволяет адресно переносить наноматериалы с одной подложки на другую.

Метод лазерной печати или лазерноиндуцированного прямого переноса с использованием пузыря (т.н. “blister-based laser-induced forward-transfer”, BB-LIFT) заключается в локальном лазерном испарении тонкого поглощающего, например,

металлического слоя, покрывающего прозрачную для излучения подложку. В результате образуется пузырь на границе подложки и поглощающего слоя, который выталкивает переносимый материал от облучаемой к приёмной подложке. В зависимости от переносимого материала и поставленной задачи могут использоваться различные модификации этого метода [16–17]. Подобный подход уже успешно применялся для переноса других углеродных наноматериалов: одностенных углеродных нанотрубок, графена, а также алмазных наночастиц [18–22]. В последнем случае использовались наночастицы размера ~ 100 нм с люминесцирующими NV-центрами. Особенность метода их засева на подложке не позволила добиться их равномерного распределения на площади, соответствующей размеру зоны лазерного переноса. Практический же интерес представляет перенос именно одиночных люминесцирующих наночастиц. В представленной работе исследована возможность лазерной печати отдельных алмазных наночастиц с люминесцирующими центрами кремний–вакансия (SiV). Отрицательно заряженный SiV-комплекс является одним из центров окраски алмаза с наиболее многообещающими применениями в квантовой обработке информации. Интерес к центрам SiV обусловлен его сильной бесфонной линией излучения на длине волны 738 нм, которая составляет около 70% от общего излучения SiV, и его инверсионной симметрией, которая приводит к стабильному оптическому переходу [23]. Равномерный засев наноалмазными частицами с SiV-центрами достигнут благодаря значительно менее концентрированной водной суспензии наноалмазов, по сравнению с суспензией, использованной в предыдущей работе [22].

1. Подготовка мишени

Для приготовления мишени использовали сапфировую подложку, на поверхность которой термически напылялся титан в вакуумной камере (10^{-5} мБар) из молибденовой лодочки, нагреваемой пропускаемым через неё током (резистивный нагрев). Толщина напыленной титановой пленки была измерена на интерференционном микроскопе Zygo NewView 5000 и составила 600 нм.

2. Лазерная разметка поверхности

Для лазерного переноса использовался эксимерный лазер KrF ($\lambda = 248$ нм, $\tau = 20$ нс) CL7000 (ООО «Оптосистемы»). Облучение проводилось с использованием проекционной схемы: в центральную часть пучка (с равномерным распределением энергии) помещалась маска необходимой формы, которая затем проецировалась на поверхность образца с уменьшением 1:20. Для адресного переноса частицы с одной подложки на другую необходимо было сначала зарегистрировать эту частицу на мишени, а затем попасть в неё лазерным пятном для осуществления переноса.

Поэтому процедура лазерного переноса состояла из нескольких этапов. На первом этапе подготовленная подложка с титановой пленкой облучалась лазером (1 импульс с плотностью энергии $0,7$ Дж/см²) со стороны металла для нанесения разметки на поверхность (рис. 1а). Плотность энергии излучения подбиралась таким образом, чтобы не вызвать нарушение (сквозную абляцию) пленки, но при этом оставить след, который затем можно было обнаружить в оптический микроскоп. В результате облучения была создана сетка на поверхности мишени с периодом 60 мкм и внутренним размером ячейки 50×50 мкм, фрагмент которой приведен на рис. 2. В начале и конце сетки образец облучался с плотностью энергии 4 Дж/см² для абляции титановой плёнки насквозь – это служило метками для прицеливания на этапе лазерного переноса, когда мишень переворачивалась и облучалась со стороны сапфировой подложки (рис. 1б).

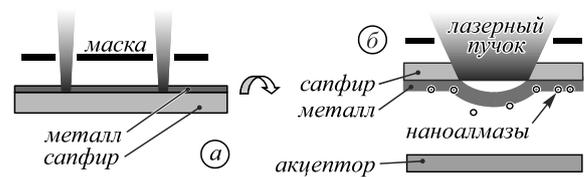


Рис. 1. Схема лазерной разметки поверхности мишени (а); схема лазерного переноса алмазных наночастиц (б)

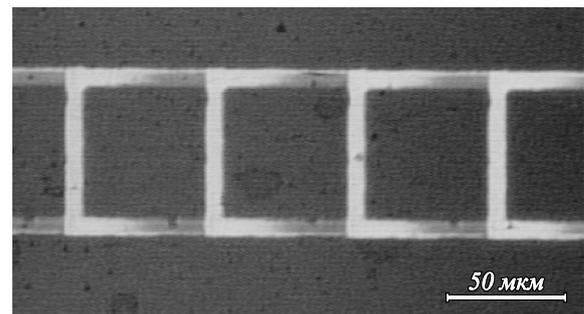


Рис. 2. Оптическое изображение мишени после лазерной разметки

3. Засев поверхности алмазными наночастицами с люминесцирующими SiV-центрами

Наноалмазы, содержащие люминесцирующие центры кремний–вакансия (SiV), были синтезированы на монокристаллической (111)-ориентированной подложке из германия методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) в микроволновом реакторе «ARDIS-100» (2,45 ГГц). Зарождение наноалмазных частиц происходит на поверхности подложки в режиме спонтанной нуклеации [24]. Условия синтеза аналогичны тем, что приведены в [25]. На основании изображений, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, средний размер выращенных наноалмазов оценивается в 400 нм, а характерная плотность распределения на подложке не превышает $0,5$ мкм⁻². Далее на германиевую подложку с выращенными на ней алмазными кристаллитами наносилась капля дистиллированной воды объемом 4 мкл.

При этом часть кристаллитов переходила в водную среду. Затем с помощью пипетки переносился 1 мкл образовавшейся слабо концентрированной водной суспензии алмазов на поверхность предварительно отожженной (при 300 °С) титановой пленки. Для равномерного нанесения частиц на поверхность металла из водной суспензии использовался метод вакуумного испарения [24]. На последнем этапе подготовки донорной подложки она повторно отжигалась в течение 30 мин на воздухе при 300°С. В результате была приготовлена мишень, содержащая 400 нм алмазные наночастицы с SiV-центрами. Плотность распределения наноалмазов на подложке оценивается в 1–3 частицы на площади размером 60×60 мкм², соответствующей размеру зоны лазерного переноса.

4. Люминесцентное картирование поверхности

Люминесцентное картирование поверхности образца проводили с помощью конфокального люминесцентного микроскопа, созданного на основе зондовой нанолaborатории NT-MDT IntegraSpectra. Для возбуждения люминесценции SiV-центров в наноалмазах использовался твердотельный лазер с длиной волны 532 нм. Лазерное излучение мощностью 160 мкВт фокусировалось на поверхность образца объективом Olympus со стократным увеличением и NA = 0,95. Отраженный назад сигнал люминесценции от SiV-центров в наноалмазах собирался тем же объективом и регистрировался лавинным фотодиодом (APD, PerkinElmer SPCM-AQRH-14). Картирование люминесценции осуществлялось перемещением образца относительно объектива с помощью пьезосканера. Полученные карты имели латеральное разрешение 110 нм. Общее время экспозиции одной карты составляло около 5 мин.

5. Лазерный перенос

На этапе лазерного переноса сначала осуществлялся поиск на оптическом микроскопе, установленном на одном оптическом столе с лазерной установкой, сквозных меток, которые стояли на концах размеченной области. Затем, зная координаты ячеек, в которых были обнаружены люминесцирующие наночастицы, производилось одноимпульсное облучение мишени с варьированием плотности энергии для поиска оптимального значения. Движение мишени между микроскопом и объективом для лазерного излучения осуществлялось с помощью трансляционного стола NewportM-ILS200PP. Изображение квадратной маски (60×60 мкм²) проецировалось объективом через прозрачную сапфировую подложку на границу с титановой пленкой. Поглощенная энергия вызывала локальное испарение тонкого металлического слоя, что приводило к образованию пузыря и выбросу алмазной наночастицы с мишени (донора) на приёмную подложку (акцептор) (рис. 1б). Приёмная подложка контактировала с мишенью, но из-за неидеальной

плоскостности двух образцов между ними был небольшой зазор. Варьирование плотности энергии осуществлялось дискретно фильтрами в диапазоне 1,1–1,8 Дж/см². В качестве акцептора использовались кремниевые подложки, предварительно очищенные в ультразвуковой ванне в течение 10 минут с использованием изопропилового спирта.

6. Результаты и обсуждение

Для решения задачи по лазерной печати алмазных наночастиц необходимо было определить такие значения плотности энергии, которые вызывают достаточный импульс для переноса наноалмаза, но при этом не возникает отлет расплавленной титановой пленки на приемную подложку. Поэтому сначала был определен порог сквозной абляции металла, который составил значение $1,8 \pm 0,1$ Дж/см². Поиск порогового значения абляции производился на расстоянии 300 мкм от области переноса алмазных наночастиц, и перенесенный на приемную подложку металл служил меткой для дальнейшего поиска наноалмазов. Как упоминалось выше, плотность засева наноалмазов на мишени составила в 1–3 частицы на площади, соответствующей размеру зоны лазерного переноса. Для лазерного облучения были выбраны ячейки, в которых находилась одна наночастица.

Карты люминесценции мишени до и после лазерного облучения с плотностями энергии в диапазоне 1,1–1,5 Дж/см² представлены на рис. 3 в строках а) и б) соответственно. Карта люминесценции приемной подложки показана на рис. 3 в строке в). Столбцы на рис. 3 соответствуют различным значениям плотности энергии, используемой в проведенных экспериментах. Эти значения указаны на рисунке сверху над соответствующей серией. Видно, что облучение с плотностями энергии 1,1 и 1,3 Дж/см² не приводит к переносу наноалмазов. В то же время после облучения с плотностью энергии 1,5 Дж/см² на приемной подложке была обнаружена алмазная наночастица с интенсивностью свечения люминесценции, близкой к исходной. При этом на мишени наночастица не была обнаружена. Облученная область на мишени и поверхность приёмной подложки были просканированы повторно для подтверждения успешного переноса наноалмаза, интенсивность сигнала при этом не изменилась. Уровень шума на люминесцентных картах соответствует примерно 2000 отсчетов/с.

Заключение

Разработан и успешно применен метод нанесения меток для адресного переноса наночастиц. На основании проведенного исследования определены оптимальные значения плотности энергии лазерного излучения для переноса отдельных алмазных наночастиц. Успешный перенос наноалмаза подтвержден люминесцентным картированием мишени и приёмной подложки.

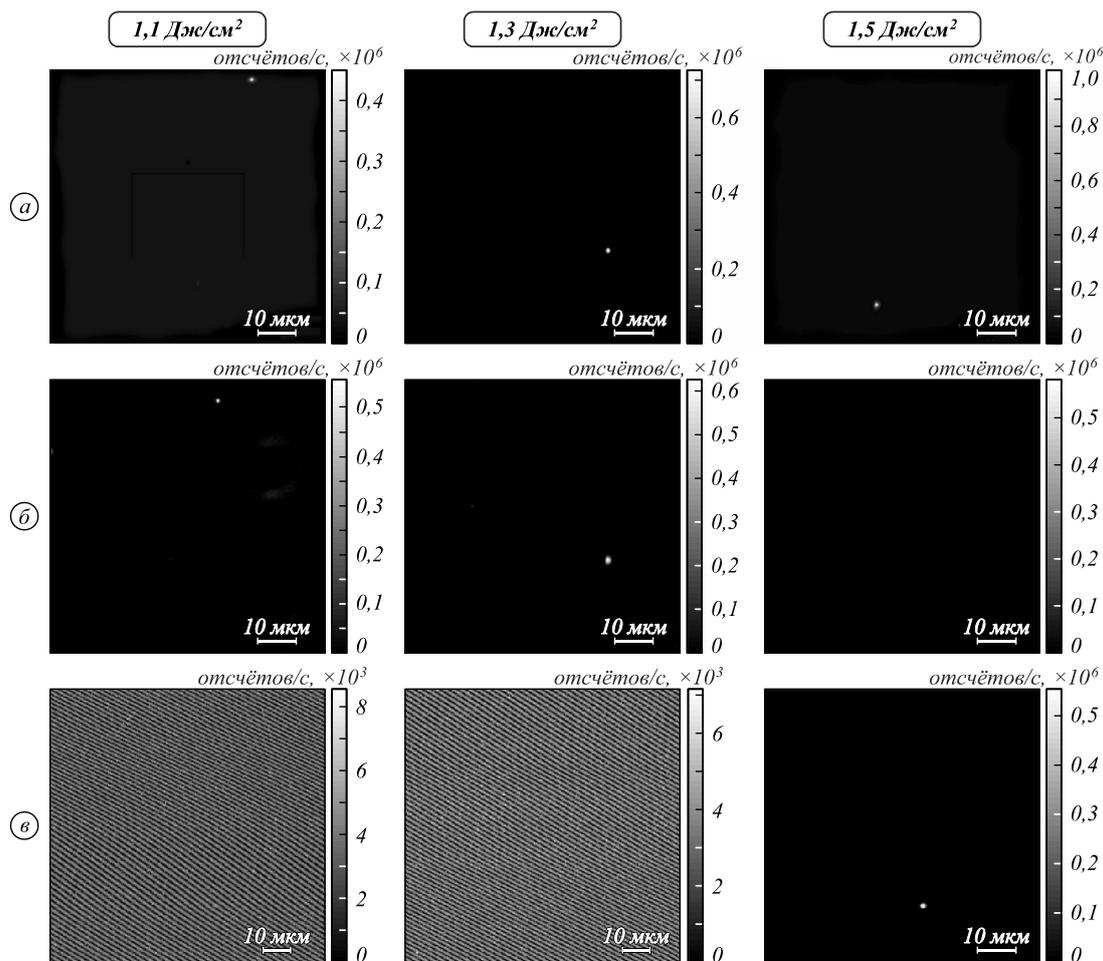


Рис. 3. Карты люминесценции донора до (а) и после (б) процедуры лазерного переноса алмазных наночастиц на поверхность акцептора (в)

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-72-10158). Авторы благодарят А.Ф. Поповича за напыление титановой пленки и А.К. Мартыанова, В.С. Седова и В.Г. Ральченко за синтез алмазных наночастиц.

Литература

1. **Gruber, A.** Scanning confocal optical microscopy and magnetic resonance on single defect centers / A. Gruber, A. Drabenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, C. von Borczyskowski // *Science*. – 1997. – Vol. 276, Issue 5321. – P. 2012-2014.
2. **Jeletzko, F.** Single defect centres in diamond: A review / F. Jeletzko, J. Wrachtrup // *Physica Status Solidi (A)*. – 2006. – Vol. 203, Issue 13. – P. 3207-3225.
3. **Vlasov, I.I.** Molecular-sized fluorescent nanodiamond / I.I. Vlasov, A.A. Shiryaev, T. Rendler, S. Steinert, S.-Y. Lee, D. Antonov, M. Vörös, F. Jeletzko, A.V. Fisenko, L.F. Semjonova, J. Biskupek, U. Kaiser, O.I. Lebedev, I. Sildos, P.R. Hemmer, V.I. Konov, A. Gali, J. Wrachtrup // *Nature Nanotechnology*. – 2014. – Vol. 9. – P. 54-58.
4. **Naydenov, B.** Dynamical decoupling of a single-electron spin at room temperature / B. Naydenov, F. Dolde, L.T. Hall, C. Shin, H. Fedder, L.C.L. Hollenberg, F. Jeletzko, J. Wrachtrup // *Physics Review B*. – 2011. – Vol. 83, Issue 8. – 081201.
5. **Lukin, M.D.** Quantum entanglement via optical control of atom-atom interactions / M.D. Lukin, P.R. Hemmer // *Physics Review Letters*. – 2000. – Vol. 84, Issue 13. – P. 2818-2821.
6. **Aharonovich, I.** Diamond photonics / I. Aharonovich, A.D. Greentree, S. Praver // *Nature Photonics*. – 2011. – Vol. 5, Issue 7. – P. 397-405.
7. **Kennard, J.E.** On-chip manipulation of single photons from a diamond defect / J.E. Kennard, J.P. Hadden, L. Marseglia, I. Aharonovich, S. Castelletto, B.R. Patton, A. Politi, J.C.F. Matthews, A.G. Sinclair, B.C. Gibson, S. Praver, J.G. Rarity, J.L. O'Brien // *Physics Review Letters*. – 2013. – Vol. 111, Issue 21. – 213603.
8. **Kononenko, V.V.** Nitrogen-vacancy defects in diamond produced by femtosecond laser nanoablation technique / V.V. Kononenko, I.I. Vlasov, V.M. Gololobov, T.V. Kononenko, T.A. Semenov, A.A. Khomich, V.A. Shershulin, V.S. Krivobok, V.I. Konov // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 111, Issue 8. – 081101.
9. **Liu, Y.** Fabrication of nitrogen vacancy color centers by femtosecond pulse laser illumination / Y. Liu, G. Chen, M. Song, X. Ci, B. Wu, E. Wu, H. Zeng // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 10. – P. 12843-12848.
10. **Chen, Y.-C.** Laser writing of coherent colourcentres in diamond / Y.-C. Chen, P.S. Salter, S. Knauer, L. Weng, A.C. Frangeskou, C.J. Stephen, S.N. Ishmael, P.R. Dolan, S. Johnson, B.L. Green, G.W. Morley, M.E. Newton, J.G. Rarity, M.J. Booth, J.M. Smith // *Nature Photonics*. – 2016. – Vol. 11. – P. 77-80.
11. **Ampem-Lassen, E.** Nano-manipulation of diamond-based single photon sources / E. Ampem-Lassen, D. Simpson,

- B. Gibson, S. Trpkovski, F.M. Hossain, S.T. Huntington, K. Ganesan, L.C.L. Hollenberg, S. Praver // Optics Express. – 2009. – Vol. 17, Issue 14. – P. 11287-11293.
12. **Schell, A.W.** A scanning probe-based pick-and-place procedure for assembly of integrated quantum optical hybrid devices / A.W. Schell, G. Kewes, T. Schroder, J. Wolters, T. Aichele, O. Benson // Review of Scientific Instruments. – 2011. – Vol. 82, Issue 7. – 073709.
 13. **Van der Sar, T.** Nanopositioning of a diamond nanocrystal containing a single nitrogen-vacancy defect center / T. Van der Sar, E.C. Heeres, G.M. Dmochowski, G. de Lange, L. Robledo, T.H. Oosterkamp, R. Hanson // Applied Physics Letters. – 2009. – Vol. 94, Issue 17. – 173104.
 14. Quantum information processing with diamond: principles and applications / ed. by S. Praver, I. Aharonovich. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2014. – P. 168-169.
 15. **Xie, X.N.** Nanoscale materials patterning and engineering by atomic force microscopy nanolithography / X.N. Xie, H.J. Chung, C.H. Sow, A.T.S. Wee // Materials Science and Engineering R Reports. – 2006. – Vol. 54, Issue 1. – P. 1-48.
 16. **Delaporte, P.** Laser-induced forward transfer: A high resolution additive manufacturing technology / P. Delaporte, A.-P. Alloncle // Optics and Laser Technology. – 2016. – Vol. 78, Part A. – P. 33-41.
 17. **Papazoglou, S.** Laser Induced Forward Transfer (LIFT) of nano-micro patterns for sensor applications / S. Papazoglou, I. Zergioti // Microelectronic Engineering. – 2017. – Vol. 182. – P. 25-34.
 18. **Smits, E.C.P.** Laser induced forward transfer of graphene / E.C.P. Smits, A. Walter, D.M. Leeuw, K. Asadi // Applied Physics Letters. – 2017. – Vol. 111, Issue 17. – 173101.
 19. **Arutyunyan, N.R.** Printing of single-wall carbon nanotubes via blister-based laser-induced forward transfer / N.R. Arutyunyan, M.S. Komlenok, T.V. Kononenko, M.A. Dezhkina, A.F. Popovich, V.I. Konov // Laser Physics. – 2019. – Vol. 29, Issue 2. – 026001.
 20. **Dezhkina, M.A.** Blister-based laser-induced forward transfer of 1D and 2D carbon nanomaterials / M.A. Dezhkina, M.S. Komlenok, P.A. Pivovarov, M.G. Rybin, N.R. Arutyunyan, A.F. Popovich, E.D. Obratsova, V.I. Konov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1571. – 012007.
 21. **Komlenok, M.S.** Printing of crumpled CVD graphene via blister-based laser-induced forward transfer / M.S. Komlenok, P.A. Pivovarov, M.A. Dezhkina, M.G. Rybin, S.S. Savin, E.D. Obratsova, V.I. Konov // Nanomaterials. – 2020. – Vol. 10. – 1103.
 22. **Komlenok, M.S.** Blister-based laser-induced forward transfer of luminescent diamond nanoparticles / M.S. Komlenok, O.S. Kudryavtsev, D.G. Pasternak, I.I. Vlasov, V.I. Konov // Physica Status Solidi A. – 2021. – Vol. 218. – 2000269.
 23. **Neu, E.** Single photon emission from silicon-vacancy colour centres in chemical vapour deposition nano-diamonds on iridium / E. Neu, D. Steinmetz, J. Riedrich-Möller, S. Gsell, M. Fischer, M. Schreck, C. Becher // New Journal of Physics. – 2011. – Vol. 13, Issue 2. – 025012.
 24. **Pasternak, D.G.** Low-temperature silicon - vacancy luminescence of individual chemical vapor deposition nanodiamonds grown by seeding and spontaneous nucleation / D.G. Pasternak, J. Dai, D.A. Kalashnikov, V.S. Sedov, A.K. Martyanov, V.G. Ralchenko, L.A. Krivitsky // Physica Status Solidi A. – 2021. – Vol. 218. – 2000274.
 25. **Romshin, A.M.** A new approach to precise mapping of local temperature fields in submicrometer aqueous volumes / A.M. Romshin, V.E. Zeeb, A.K. Martyanov, O.S. Kudryavtsev, D.G. Pasternak, V.S. Sedov, V.G. Ralchenko, A.G. Sinogeikin, I.I. Vlasov // Scientific Reports. – 2021 – Vol. 13, Issue 1. – 14228.

Сведения об авторах

Комленок Максим Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела светоиндуцированных поверхностных явлений центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: лазерная обработка и исследование различных углеродных и кремниевых материалов, спектроскопия и структурная модификация, нанофотоника. E-mail: komlenok@nsc.gpi.ru.

Кудрявцев Олег Сергеевич, исполняющий обязанности младшего научного сотрудника отдела светоиндуцированных поверхностных явлений центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: люминесценция, одиночные центры окраски в наноалмазах, CVD, HPHT. E-mail: leoleg@mail.ru.

Пастернак Дмитрий Григорьевич, исполняющий обязанности младшего научного сотрудника отдела светоиндуцированных поверхностных явлений центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: люминесценция, одиночные центры окраски в наноалмазах, CVD, HPHT. E-mail: dg.pasternak@physics.msu.ru.

Власов Игорь Иванович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Углеродной нанофотоники центра естественно-научных исследований института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: оптическая спектроскопия, новые углеродные материалы, нанофотоника. E-mail: vlasov@nsc.gpi.ru.

Конов Виталий Иванович, академик РАН, руководитель центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: лазерное взаимодействие с веществом; физика плазмы; лазерная обработка материалов, синтез, исследование и применение новых углеродных материалов, нанотехнологии. E-mail: vik@nsc.gpi.ru.

ГРНТИ: 29.33.47

Поступила в редакцию 7 мая 2021 г. Окончательный вариант – 7 сентября 2021 г.

Laser printing of diamond nanoparticles with luminescent SiV centers

M.S. Komlenok¹, O.S. Kudryavtsev¹, D.G. Pasternak¹, I.I. Vlasov¹, V.I. Konov¹

¹ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
119991, Moscow, Russian Federation, 38 Vavilova str.

Abstract

A possibility of laser printing of single diamond nanoparticles with luminescent SiV centers is demonstrated. To provide the transfer, a target consisting of a transparent sapphire plate and an absorbing thin titanium film (600 nm thick) coated with nanoparticles was irradiated with a KrF excimer laser ($\lambda=248$ nm, $\tau=20$ ns). Optimal values of the laser fluence have been determined and a technique for applying labels for the targeted transfer of nanoparticles has been developed. Luminescence mapping of the donor and the receiving substrates confirmed the transfer of diamond nanoparticles with SiV centers.

Keywords: nanophotonics and optics of nanostructures, laser printing, diamond nanoparticles, NV centers, excimer lasers.

Citation: Komlenok MS, Kudryavtsev OS, Pasternak DG, Vlasov II, Konov VI. Laser printing of diamond nanoparticles with luminescent SiV centers. *Computer Optics* 2021; 45(6): 860-864. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-918.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 18-72-10158). The authors thank A.F.Popovich for the deposition of a titanium film and A.K.Martyanov, V.S.Sedov and V.G.Ralchenko for the synthesis of diamond nanoparticles.

References

- [1] Gruber A, Drabenstedt A, Tietz C, Fleury L, Wrachtrup J, von Borczyskowski C. Scanning confocal optical microscopy and magnetic resonance on single defect centers. *Science* 1997; 276(5321): 2012-2014.
 - [2] Jelezko F, Wrachtrup J. Single defect centres in diamond: A review. *Physica Status Solidi (A)* 2006; 203: 3207–25.
 - [3] Vlasov II, Shiryayev AA, Rendler T, Steinert S, Lee S-Y, Antonov D, Vörös M, Jelezko F, Fisenko AV, Semjonova LF, Biskupek J, Kaiser U, Lebedev OI, Sildos I, Hemmer PR, Konov VI, Gali A, Wrachtrup J. Molecular-sized fluorescent nanodiamond. *Nature Nanotechnology* 2014; 9: 54-8.
 - [4] Naydenov B, Dolde F, Hall LT, Shin C, Fedder H, Hollenberg LCL, Jelezko F, Wrachtrup J. Dynamical decoupling of a single-electron spin at room temperature. *Phys Rev B* 2011; 83(8): 081201.
 - [5] Lukin MD, Hemmer PR. Quantum entanglement via optical control of atom-atom interactions. *Phys Rev Lett* 2000; 84(13): 2818-2821.
 - [6] Aharonovich I, Greentree AD, Prawer S. Diamond photonics. *Nat Photonics* 2011; 5(7): 397-405.
 - [7] Kennard JE, Hadden JP, Marseglia L, Aharonovich I, Castelletto S, Patton BR, Politi A, Matthews JCF, Sinclair AG, Gibson BC, Prawer S, Rarity JG, O'Brien JL. On-chip manipulation of single photons from a diamond defect. *Phys Rev Lett* 2013; 111(21): 213603.
 - [8] Kononenko VV, Vlasov II, Gololobov VM, Kononenko TV, Semenov TA, Khomich AA, Shershulin VA, Krivobok VS, Konov VI. Nitrogen-vacancy defects in diamond produced by femtosecond laser nanoablation technique. *Appl Phys Lett* 2017; 111(8): 081101.
 - [9] Liu Y, Chen G, Song M, Ci X, Wu B, Wu E, Zeng H. Fabrication of nitrogen vacancy color centers by femtosecond pulse laser illumination. *Opt Express* 2013; 21(10): 12843-12848.
 - [10] Chen Y-C, Salter PS, Knauer S, Weng L, Frangeskou AC, Stephen CJ, Ishmael SN, Dolan PR, Johnson S, Green BL, Morley GW, Newton ME, Rarity JG, Booth MJ, Smith JM. Laser writing of coherent colour centres in diamond. *Nat Photonics* 2016; 11: 77-80.
 - [11] Ampem-Lassen E, Simpson D, Gibson B, Trpkovski S, Hossain FM, Huntington ST, Ganesan K, Hollenberg LCL, Prawer S. Nano-manipulation of diamond-based single photon sources. *Opt Express* 2009; 17(14): 11287-11293.
 - [12] Schell AW, Kewes G, Schroder T, Wolters J, Aichele T, Benson O. A scanning probe-based pick-and-place procedure for assembly of integrated quantum optical hybrid devices. *Rev Sci Instrum* 2011; 82(7): 073709.
 - [13] Van der Sar T, Heeres EC, Dmochowski GM, de Lange G, Robledo L, Oosterkamp TH, Hanson R. Nanopositioning of a diamond nanocrystal containing a single nitrogen-vacancy defect center. *Appl Phys Lett* 2009; 94(17): 173104.
 - [14] Prawer S, Aharonovich I, eds. Quantum information processing with diamond: principles and applications. Cambridge: Woodhead Publishing; 2014: 168-169.
 - [15] Xie XN, Chung HJ, Sow CH, Wee ATS. Nanoscale materials patterning and engineering by atomic force microscopy nanolithography. *Mat Sci Eng R* 2006; 54(1): 1-48.
 - [16] Delaporte P, Alloncle A-P. Laser-induced forward transfer: A high resolution additive manufacturing technology. *Opt Laser Technol* 2016; 78(A): 33-41.
 - [17] Papazoglou S, Zergioti I. Laser Induced Forward Transfer (LIFT) of nano-micro patterns for sensor applications. *Microelectron Eng* 2017; 182: 25-34.
 - [18] Smits ECP, Walter A, Leeuw DM, Asadi K. Laser induced forward transfer of graphene. *Appl Phys Lett* 2017; 111(17): 173101.
 - [19] Arutyunyan NR, Komlenok MS, Kononenko TV, Dezhkina MA, Popovich AF, Konov VI. Printing of single-wall carbon nanotubes via blister-based laser-induced forward transfer. *Laser Phys* 2019; 29(2): 026001.
 - [20] Dezhkina MA, Komlenok MS, Pivovarov PA, Rybin MG, Arutyunyan NR, Popovich AF, Obraztsova ED, Konov VI. Blister-based laser-induced forward transfer of 1D and 2D carbon nanomaterials. *J Phys Conf Ser* 2020; 1571: 012007.
 - [21] Komlenok MS, Pivovarov PA, Dezhkina MA, Rybin MG, Savin SS, Obraztsova ED, Konov VI. Printing of crumpled
-

-
- CVD graphene via blister-based laser-induced forward transfer. *Nanomaterials* 2020; 10: 1103.
- [22] Komlenok MS, Kudryavtsev OS, Pasternak DG, Vlasov II, Konov VI. Blister-based laser-induced forward transfer of luminescent diamond nanoparticles. *Physica Status Solidi A* 2021; 218: 2000269.
- [23] Neu E, Steinmetz D, Riedrich-Möller J, Gsell S, Fischer M, Schreck M, Becher C. Single photon emission from silicon-vacancy colour centres in chemical vapour deposition nano-diamonds on iridium. *New J Phys* 2011; 13(2): 025012.
- [24] Pasternak DG, Dai J, Kalashnikov DA, Sedov VS, Martyanov AK, Ralchenko VG, Krivitsky LA. Low-temperature silicon-vacancy luminescence of individual chemical vapor deposition nanodiamonds grown by seeding and spontaneous nucleation. *Physica Status Solidi A* 2020; 218: 2000274.
- [25] Romshin AM, Zeeb VE, Martyanov AK, Kudryavtsev OS, Pasternak DG, Sedov VS, Ralchenko VG, Sinogeikin AG, Vlasov II. A new approach to precise mapping of local temperature fields in submicrometer aqueous volumes. *Scientific Reports* 2021; 13(1): 14228.
-

Authors' information

Maxim Sergeevich Komlenok, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; researcher of Laser Induced Surface Phenomena department, Natural Sciences Center of A.M. Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia. Research interests: laser processing and characterization of different carbon and silicon materials, spectroscopic diagnostics, and structure modification. E-mail: komlenok@nsc.gpi.ru.

Oleg Sergeevich Kudryavtsev, Junior Researcher of Laser Induced Surface Phenomena department, Natural Sciences Center of General Physics Institute, Moscow, Russia. Research interests: luminescence, single color centers in nanodiamonds, CVD, HPHT. E-mail: leolegk@mail.ru.

Dmitrii Grygorevich Pasternak, Junior Researcher of Laser Induced Surface Phenomena department, Natural Sciences Center of General Physics Institute, Moscow, Russia. Research interests: luminescence, single color centers in nanodiamonds, CVD, HPHT. E-mail: dg.pasternak@physics.msu.ru.

Igor Ivanovich Vlasov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Carbon Nanophotonics, Natural Sciences Center of General Physics Institute of A.M. Prokhorov General Physics Institute Russian Academy of Sciences. Research interests: optical spectroscopy, new carbon materials, nanophotonics. E-mail: vlasov@nsc.gpi.ru.

Vitaly Ivanovich Konov, academician of Russian Academy of Sciences, director of Natural Sciences Center of A.M. Prokhorov General Physics Institute. Research interests: laser interaction with matter; plasma physics; laser materials processing; synthesis, characterization and applications of novel carbon materials; nanotechnologies. E-mail: vik@nsc.gpi.ru.

Received May 7, 2021. The final version – September 7, 2021.
