

## Лазерная печать отдельных пикселей нанополос графена

М.С. Комленок<sup>1</sup>, П.В. Федотов<sup>1</sup>, П.А. Пивоваров<sup>1</sup>, В.И. Конов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,  
119991, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

### Аннотация

Продемонстрирована возможность лазерной печати на кремниевую подложку пикселей нанополос графена с сохранением целостности их структуры и формы в соответствии с облучаемым лазерным пятном. Для осуществления переноса мишень, состоящая из прозрачной сапфировой пластины и поглощающей тонкой пленки титана (толщиной 500 нм), покрытой пленкой, состоящей из нанополос графена, облучалась эксимерным лазером KrF ( $\lambda = 248$  нм,  $\tau = 20$  нс). Определены оптимальные условия лазерного облучения, и разработана система переноса углеродного наноматериала с ростовой никелевой поверхности на титановую пленку с созданием более прочных связей между нанополосами. Спектроскопия комбинационного рассеяния света подтвердила сохранение после лазерного переноса структурных особенностей синтезированных атомарно-точных нанополос графена шириной 7 атомов углерода с краем типа «кресло».

**Ключевые слова:** нанополосы графена, лазерно-индуцированный прямой перенос, углеродные наноматериалы, эксимерные лазеры.

**Цитирование:** Комленок, М.С. Лазерная печать отдельных пикселей нанополос графена / М.С. Комленок, П.В. Федотов, П.А. Пивоваров, В.И. Конов // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 3. – С. 371-375. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1331.

**Citation:** Komlenok MS, Fedotov PV, Pivovarov PA, Konov VI. Laser printing of certain pixels of graphene nanoribbons. Computer Optics 2024; 48(3): 371-375. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1331.

### Введение

Обладающий уникальными физическими свойствами графен привлекает внимание как с точки зрения фундаментальных научных исследований за счет возможности управления его свойствами, так и выступая перспективным материалом для технологического применения в различных областях благодаря совершенствованию методов синтеза таких пленок. Разработка же в последние годы технологии синтеза уже одномерных углеродных структур, нанополос графена (НПП), с использованием рекристаллизованных подложек из благородных металлов в сверхвысоком вакууме методом «bottom-up» [1–3] привела к закономерному росту интереса фундаментальных исследований таких структур, но сразу с прицелом на технологическое применение [4–9]. При этом во многом характерные проблемы, связанные с механическим повреждением структуры графеновых листов при их переносе с нуклеационных поверхностей на конечные подложки, возникают и при манипуляциях с атомарно-точными полосами графена, имеющими наноразмеры по двум направлениям. Характерная ширина таких НПП, составляющая 1–2 нм, в сочетании с нанометровой толщиной графена задаёт выраженную резонансную электронную структуру и ширину формируемой при этом запрещенной зоны [10]. Периодичность же кристаллической структуры таких объектов, завязанная на отсутствие дефектов по третьему направлению, определяет положение резонансных особенностей НПП [11]. Таким образом, любые манипуляции с таким деликатным материалом, к то-

му же имеющим слабую адгезию к подложкам, могут повышать дефектность структуры, неуправляемо изменяя его конечные свойства. По этой причине широко используемые литографические методы для создания транзисторов, требующие многократного нанесения резистов для формирования металлических контактов и транзисторного канала, с затруднением могут использоваться для технологии с применением НПП. Методики лазерного переноса получили в последнее время большое развитие именно благодаря возможности тонкой подстройки режимов и селективности воздействия на наноматериалы, что повышает сохранность их кристаллографической структуры и свойств [12–17]. Основным преимуществом таких методов, помимо селективности воздействия, является минимизация промежуточных манипуляций с переносимым материалом.

В настоящей работе усовершенствован так называемый блистерный лазерно-индуцированный прямой перенос (BB-LIFT) [15–18] с целью печати выбранных участков слоя НПП с максимальным сохранением заданной геометрии и их исходных свойств. В данном методе переноса импульсный лазерный нагрев тонкого слоя металлического поглотителя на прозрачной для излучения подложке вызывает быстрое формирование так называемого блистера или пузыря за счет роста давления и направленный сброс наноматериала в направлении распространения лазерного пучка к приемной подложке, акцептору. При этом использование металлической пленки обеспечивает не только передачу импульса переносимому материалу, но и снижает вероятность ло-

кальных повреждений лазерным излучением переносимого материала.

### 1. Эксперимент

Для осуществления блистерного лазерно-индуцированного прямого переноса необходимо два типа образцов: доноров, с которых производится перенос, и приемных подложек – акцепторов. В настоящих экспериментах доноры подготавливались в два этапа. Сначала на поверхность полированной пластины из монокристаллического сапфира осаждался слой титана, который служил поглотителем энергии импульсного лазерного излучения. Пленка металла контролируемой толщины наносилась в вакуумной камере (давление  $10^{-5}$  мбар) за счет нагрева до  $1800^{\circ}\text{C}$  титановой проволоки толщиной 1 мм с содержанием  $\text{Ti} > 99,99\%$  в молибденовой лодочке при пропускании через нее тока. Изменяя навеску металла в лодочке, можно варьировать конечную толщину пленки на подложке. В наших экспериментах мы получали толщину титанового слоя 500 нм.

За время синтеза НПП методом модифицированного химического газофазного осаждения (см. [18] и цитируемую там литературу) происходит рост отдельных нанополос, формирующих при этом близко-расположенные пучки на никелевой поверхности. Перенос такого слоя НПП с ростовой поверхности на титановую пленку, осажденную на сапфировую подложку (донорную), мы производили двумя методами: без использования полиметилметакрилата (ПММА) и с использованием слоя ПММА для стабилизации слоя НПП, которые далее называем образцами первого и второго типа соответственно. После осаждения слоя НПП на титановую поверхность проводилось химическое удаление ПММА.

В роли приемной подложки (акцепторной) были выбраны кремниевые подложки со слоем двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) толщиной 90 нм, который дает хороший контраст с графеном в видимом диапазоне длин волн, позволяя контролировать состояние углеродных материалов на таких подложках оптическими методами [19].

Для визуального контроля за лазерным переносом НПП использовался оптический микроскоп Axiotech 25HD (Carl Zeiss). Кристаллическая структура углеродного наноматериала до и после лазерного воздействия как на исходных подложках, так и на приемных подложках анализировалась с помощью спектрометра Horiba Lab RAM HR Evolution (спектральное разрешение  $1\text{ см}^{-1}$ ), оснащенного диодным лазером (длина волны – 532 нм).

Лазерный перенос осуществлялся с помощью эксимерного лазера (CL7100, ООО “Оптосистемы”)  $\text{KrF}$  ( $\lambda = 248\text{ нм}$ ,  $\tau = 20\text{ нс}$ ). На рис. 1 показан схематично процесс лазерной печати. Подложки доноров и акцепторов располагались в непосредственном контакте друг с другом перпендикулярно сфокусированному

лазерному излучению. Лазерный пучок направлялся вертикально вниз на металлический слой поглотителя через квадратную маску и сапфировую подложку. При этом маска вырезала центральную однородную по распределению энергии часть лазерного пучка. В используемой проекционной схеме изображение маски уменьшалось в 20 раз в пятно  $60 \times 60\text{ мкм}^2$ . В экспериментах плотность энергии лазерного излучения в области воздействия варьировалась с помощью интерференционных фильтров в диапазоне от 0,25 до 1,3 Дж/см<sup>2</sup>.

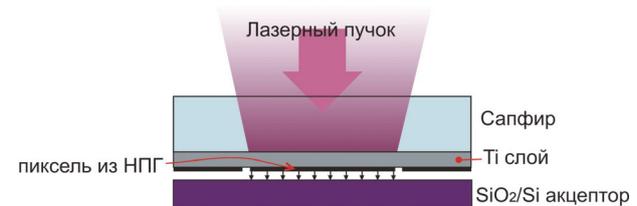


Рис. 1. Схема лазерно-индуцированного прямого переноса

Для облегчения отрыва переносимого материала от донора в части экспериментов проводилась предварительная обрезка границ переносимого пикселя.

### 2. Результаты и обсуждение

Оптические изображения донорной и акцепторной подложек после переноса НПП первого типа представлены на рис. 2. Порог абляции титановой пленки составил  $0,80 \pm 0,05\text{ Дж/см}^2$ . Минимальное значение плотности энергии, при котором наблюдался перенос НПП, составляло  $0,25 \pm 0,05\text{ Дж/см}^2$ . Таким образом, рабочий диапазон плотностей энергии, при которых происходит перенос НПП первого типа без повреждения титановой пленки, находится в пределах  $0,25 - 0,7\text{ Дж/см}^2$ . При снижении плотности энергии в импульсе до  $0,3\text{ Дж/см}^2$  наблюдается лишь частичный перенос углеродного наноматериала, т.к. форма отлетевшего с донора пикселя сильно отличается от квадратной. Во всех случаях облучения на акцепторной подложке наблюдаются фрагменты нерегулярной формы перенесенных НПП микронного размера. Также следует отметить, что с уменьшением плотности энергии в импульсе средний размер отдельных перенесенных фрагментов увеличивается.

Возможной причиной разлета переносимого углеродного наноматериала на фрагменты является образование слишком большого пузыря, необходимого для отрыва от поверхности. Для его уменьшения мы провели эксперименты по предварительной обрезке периметра переносимого пикселя, которая должна облегчить отрыв переносимого участка НПП от донора. Данный способ предварительной обрезки успешно применялся нами ранее для переноса одностенных углеродных нанотрубок [15, 16]. Обрезка проходила при плотности энергии  $1\text{ Дж/см}^2$ . На рис. 3 приведены оптические изображения донорной и акцепторной подложек после переноса НПП первого типа с ука-

занной обрезкой границ. При этом вопреки ожиданиям рабочий диапазон плотностей энергии переноса наноматериала с предварительной обрезкой границ не расширился в сторону меньших значений, а остался в тех же пределах и составил  $0,3–0,7 \text{ Дж/см}^2$ . Однако размер переносимых фрагментов значительно увеличился по сравнению с предыдущим случаем. По всей видимости, необходимый для переноса импульс, создаваемый при лазерном воздействии, слишком велик и приводит к нарушению целостности нанополос графена, состоящей из НППГ.

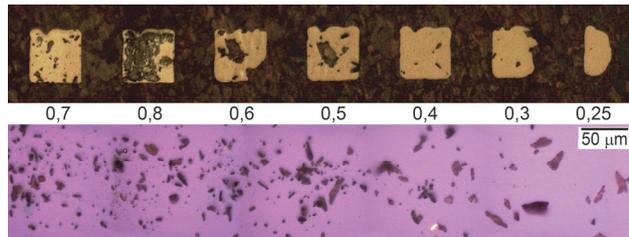


Рис. 2. Оптическое изображение донора с НППГ 1 типа (сверху) и акцептора (снизу) после лазерного переноса с различными плотностями энергии в импульсе (указаны в интервале между донором и акцептором в  $\text{Дж/см}^2$ )

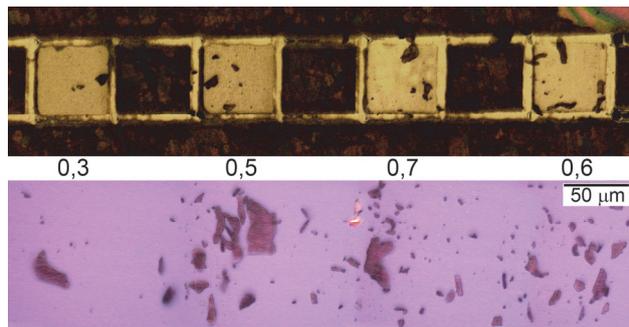


Рис. 3. Оптическое изображение донора с НППГ 1 типа (сверху) и акцептора (снизу) после лазерного переноса (с применением обрезки) с различными плотностями энергии в импульсе (указаны в интервале между донором и акцептором в  $\text{Дж/см}^2$ )

Следующая серия экспериментов была проведена с образцами-донорами, содержащими второй тип НППГ. Оптические изображения донорной и акцепторной подложек после переноса таких НППГ без предварительной обрезки представлены на рис. 4. Порог абляции титановой пленки с таким углеродным покрытием увеличился и составил  $1,30 \pm 0,05 \text{ Дж/см}^2$ . Минимальное значение плотности энергии, при котором наблюдался перенос НППГ, составляло  $0,35 \pm 0,05 \text{ Дж/см}^2$ . Таким образом, рабочий диапазон плотностей энергии, при которых происходит перенос НППГ второго типа, стал заметно шире и находится в пределах  $0,35–1,2 \text{ Дж/см}^2$ . При этом снижение плотности энергии в импульсе до  $1 \text{ Дж/см}^2$  приводит уже к неполному отлету пикселя от поверхности донора, на что указывают наблюдаемые в зоне облучения перенесенные участки НППГ. При этом на приемной подложке наблюдаются крупные фрагменты НППГ, однако по форме отличающиеся от квадратного пятна облучения. Как и в предыдущем

случае, наблюдается фрагментация переносимого пикселя. На рис. 5 показаны оптические изображения донорной и акцепторной подложек после переноса НППГ второго типа с обрезкой границ. В этом случае наблюдается перенос квадратных пикселей, соответствующих пятну облучения. При максимальных плотностях энергии рабочего диапазона  $1,2$  и  $1,1 \text{ Дж/см}^2$  происходит распад перенесенного пикселя на 2 части. При использовании более низких плотностей энергии  $1$ ,  $0,85$  и  $0,75 \text{ Дж/см}^2$  наблюдается перенос квадратного пикселя в соответствии с пятном облучения. Стоит отметить, что без обрезки границ при таких плотностях энергии наблюдался лишь частичный перенос НППГ. Смещение рабочего диапазона плотностей энергии в большую сторону для пленок НППГ второго типа связано, по всей видимости, с их большей плотностью и, соответственно, большей теплопроводностью. Теплопроводность используемых НППГ неизвестна, но для аналогичных углеродных наноматериалов – графена или углеродных нанотрубок она превышает  $3000 \text{ Вт/мК}$ , что, в свою очередь, на несколько порядков превосходит теплопроводность титановой пленки  $22 \text{ Вт/мК}$ . Поэтому увеличившийся отвод тепла при лазерном импульсном нагреве вызвал повышение порогов абляции и отлета более плотной пленки НППГ.

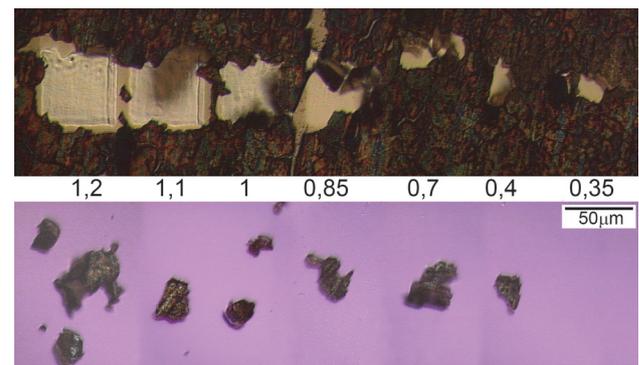


Рис. 4. Оптическое изображение донора с НППГ 2-го типа (сверху) и акцептора (снизу) после лазерного переноса с различными плотностями энергии в импульсе (указаны в интервале между донором и акцептором в  $\text{Дж/см}^2$ )

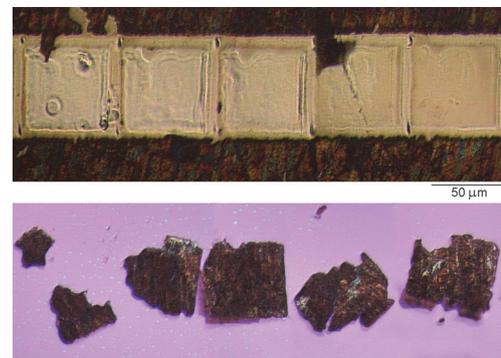


Рис. 5. Оптическое изображение донора с НППГ 2-го типа (сверху) и акцептора (снизу) после лазерного переноса с предварительной обрезкой границ и с различными плотностями энергии в импульсе (указаны в интервале между донором и акцептором в  $\text{Дж/см}^2$ )

Полученные результаты, по нашему мнению, указывают, что эффект от использования ПММА при переносе НПП заключается в сохранении в этом случае структуры слоя углеродного материала, получаемой во время синтеза на поверхности никелевой фольги. Это обеспечивает формирование более однородного слоя НПП как с точки зрения теплофизических характеристик, так и с точки зрения адгезии его к поверхности металлического слоя поглотителя и способствует сохранению целостности пикселя при печати.

Контроль за сохранением свойств переносимого материала осуществлялся с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) (рис. 6). Анализ спектров показывает сохранение всех характерных черт исходных НПП шириной 7 атомов углерода с краем типа «кресло» (7аНПП) [20–24] для обоих типов образцов до и после лазерного переноса. Моды G ( $1605\text{ см}^{-1}$ ) и D ( $1343\text{ см}^{-1}$ ) являются основными для 7-аНПП. G-мода 7-аНПП как и в графене – КРС мода первого порядка, но может расщепляться на две компоненты G+ и G–. В НПП D-мода в отличие от графена является процессом первого порядка и ее интенсивность заметно возрастает и становится сравнимой с интенсивностью G-моды. Наблюдаемые на спектрах КРС пики на частотах  $1220\text{ см}^{-1}$  и  $1260\text{ см}^{-1}$  связаны с вибрационными модами изгиба в плоскости C–H связей на краях НПП типа «кресло» [24]. Слабый пик на частоте  $396\text{ см}^{-1}$ , отвечающий известному экспериментальному [20] и теоретическому [23] значению частоты дыхательных мод для 7-аНПП, наблюдается как в исходной пленке, так и на перенесенных участках. Моды второго порядка, характерные для НПП в высокочастотной области спектра ( $2550–3250\text{ см}^{-1}$ ), также наблюдаются до и после переноса и имеют сравнимые амплитуды.

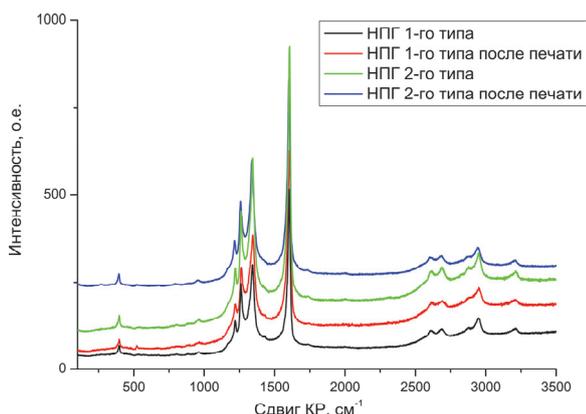


Рис. 6. Спектры КРС нанополос графена до и после лазерного переноса

### Заключение

Проведенные исследования позволили определить эффективную методику приготовления донорных образцов и параметры их облучения для печати пикселей, состоящих из нанополос графена, с сохранением целостности их кристаллической структуры и формы

в соответствии с облучаемым лазерным пятном. Так, для приготовления слоя НПП на доноре необходимо использовать ПММА при переносе НПП с ростовой никелевой поверхности на титановую пленку. Это позволяет создавать более связанное состояние нанополос друг с другом, предотвращающее фрагментирование пикселя во время лазерного переноса. Лазерную печать необходимо осуществлять в два этапа: сначала производить обрезку границ переносимой области, а затем уже её облучать. Спектроскопия КРС подтвердила сохранение при таком лазерном переносе структурных особенностей синтезированных атомно-точных нанополос графена шириной 7 атомов углерода с краем типа «кресло». В дальнейшем нами планируется лазерная печать НПП на контакты полевого транзистора и измерение его характеристик.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-72-10158). Авторы благодарят А.Ф. Поповича за напыление титановых пленок.

### References

- [1] Kimouche A, Ervasti MM, Drost R, Halonen S, Harju A, Joensuu PM, Sainio J, Liljeroth P. Ultra-narrow metallic armchair graphene nanoribbons. *Nat Commun* 2015; 6: 10177. DOI: 10.1038/ncomms10177.
- [2] Ruffieux P, Wang S, Yang B, Sanchez-Sanchez C, Liu J, Dienel T, Talirz L, Shinde P, Pignedoli CA, Passerone D, Dumslaff T, Feng X, Mullen K, Fasel R. On-surface synthesis of graphene nanoribbons with zigzag edge topology. *Nature* 2016; 531(7595): 489. DOI: 10.1038/nature17151.
- [3] Talirz L, Ruffieux P, Fasel R. On-surface synthesis of atomically precise graphene nanoribbons. *Adv Mater* 2016; 28(29): 6222. DOI: 10.1002/adma.201505738.
- [4] Bennett PB, Pedramrazi Z, Madani A, Chen Y-C, de Oteyza DG, Chen C, Fischer FR, Crommie MF, Bokor J. Bottom-up graphene nanoribbon field-effect transistors. *Appl Phys Lett* 2013; 103(25): 253114. DOI: 10.1063/1.4855116.
- [5] Llinas JP, Fairbrother A, BorinBarin G, Shi W, Lee K, Wu S, Yong Choi B, Braganza R, Lear J, Kau N, Choi W, Chen C, Pedramrazi Z, Dumslaff T, Narita A, Feng X, Mullen K, Fischer F, Zettl A, Ruffieux P, Yablonovitch E, Crommie M, Fasel R, Bokor J. Short-channel field-effect transistors with 9-atom and 13-atom wide graphene nanoribbons. *Nat Commun* 2017; 8(1): 633. DOI: 10.1038/s41467-017-00734-x.
- [6] Chen Z, Zhang W, Palma CA, Lodi Rizzini A, Liu B, Abbas A, Richter N, Martini L, Wang XY, Cavani N, Lu H, Mishra N, Coletti C, Berger R, Klappenberger F, Klaui M, Candini A, Affronte M, Zhou C, De Renzi V, Del Pennino U, Barth JV, Rader HJ, Narita A, Feng X, Mullen K. Synthesis of graphene nanoribbons by ambient-pressure chemical vapor deposition and device integration. *J Am Chem Soc* 2016; 138(47): 15488. DOI: 10.1021/jacs.6b10374.
- [7] Liu M, Tjiu WW, Pan J, Zhang C, Gao W, Liu T. One-step synthesis of graphene nanoribbon-MnO<sub>2</sub> hybrids and their all-solid-state asymmetric supercapacitors. *Nanoscale* 2014; 6(8): 4233. DOI: 10.1039/C3NR06650A.
- [8] Li L, Raji AR, Fei H, Yang Y, Samuel EL, Tour JM. Bandgap engineering of coal-derived graphene quantum

- dots. ACS Appl Mater Interfaces 2013; 7(12): 7041-7048. DOI: 10.1021/acsami.5b01419.
- [9] Sevincli H, Sevik C, Cain T, Cuniberti G. A bottom-up route to enhance thermoelectric figures of merit in graphene nanoribbons. Sci Rep 2013; 3: 1228. DOI: 10.1038/srep01228.
- [10] Son YW, Cohen ML, Louie SG. Energy gaps in graphene nanoribbons. Phys Rev Lett 2007; 98: 089901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.216803.
- [11] Kimouche A, Ervasti MM, Drost R, Halonen S, Harju A, Joensuu PM, Sainio J, Liljeroth P. Ultra-narrow metallic armchair graphene nanoribbons. Nat Commun 2015; 6: 10177. DOI: 10.1038/ncomms10177.
- [12] Delaporte P, Alloncle A-P. Laser-induced forward transfer: A high resolution additive manufacturing technology. Opt Laser Tech 2016; 78(A): 33-41. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.09.022.
- [13] Papazoglou S, Zergioti I. Laser Induced Forward Transfer (LIFT) of nano-micro patterns for sensor applications. Microelectron Eng 2017; 182: 25-34. DOI: 10.1016/j.mee.2017.08.003.
- [14] Smits ECP, Walter A, Leeuw DM, Asadi K. Laser induced forward transfer of graphene. Appl Phys Lett 2017; 111: 173101.
- [15] 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: 026001.
- [16] Dezhkina MA, Komlenok MS, Pivovarov PA, Rybin MG, Arutyunyan NR, Popovich AF, Obratsova ED, Konov VI. Blister-based laser-induced forward transfer of 1D and 2D carbon nanomaterials. J Phys Conf Ser 2020; 1571: 012007.
- [17] Komlenok MS, Pivovarov PA, Dezhkina MA, Rybin MG, Savin SS, Obratsova ED, Konov VI. Printing of crumpled CVD Graphene via blister-based laser-induced forward transfer. Nanomaterials 2020; 10: 1103.
- [18] Komlenok MS, Fedotov PV, Kurochitsky ND, Popovich AF, Pivovarov PA. Laser-induced forward transfer of graphene nanoribbons. Doklady Phys 2022; 67: 228-235. DOI: 10.1134/S102833582208002X.
- [19] Blake P, Hill EW, Castro Neto AH. Making graphene visible. Appl Phys Lett 2007; 91: 063124. DOI: 10.1063/1.2768624.
- [20] Cai J, Ruffieux P, Jaafar R, Bieri M, Braun T, Blankenburg S, Muoth M, Seitsonen AP, Saleh M, Feng X. Atomically precise bottom-up fabrication of graphene nanoribbons. Nature 2010; 466: 470-473. DOI: 10.1038/nature09211.
- [21] Huang H, Wei D, Sun J, Wong SL, Feng YP, Neto AH, Wee AT. Spatially resolved electronic structures of atomically precise armchair graphene nanoribbons. Sci Rep 2012; 2: 983. DOI: 10.1038/srep00983.
- [22] Borin Barin G, Fairbrother A, Rotach L, Bayle M, Paillet M, Liang L, Meunier V, Hauert R, Dumsclaff T, Narita A. Surface-synthesized graphene nanoribbons for room temperature switching devices: Substrate transfer and *ex situ* characterization. ACS Appl Nano Mater 2019; 2(4): 2184-2192. DOI: 10.1021/acsanm.9b00151.
- [23] Zhou J, Dong J. Vibrational property and Raman spectrum of carbon nanoribbon. Appl Phys Lett 2007; 91: 173108. DOI: 10.1063/1.2800796.
- [24] Gillen R, Mohr M, Thomsen C, Maultzsch J. Vibrational properties of graphene nanoribbons by first-principles calculations. Phys Rev B 2009; 80: 155418. DOI: 10.1103/PhysRevB.80.155418.

### 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, нанопотоника. E-mail: [komlenok@nsc.gpi.ru](mailto:komlenok@nsc.gpi.ru)

**Федотов Павел Владимирович**, 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: синтез углеродных наноматериалов, люминесцентная спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света, нанопотоника. E-mail: [fedotopavel@mail.ru](mailto:fedotopavel@mail.ru)

**Пивоваров Павел Александрович**, 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: взаимодействие лазерного излучения с веществом, нелинейная оптика, атомно-силовая микроскопия, углеродные наноматериала. E-mail: [p\\_pivovarov@hotmail.com](mailto:p_pivovarov@hotmail.com)

**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 углеродных материалов, исследование и применение новых углеродных материалов, нанотехнологии. E-mail: [vik@nsc.gpi.ru](mailto:vik@nsc.gpi.ru)

ГРНТИ: 29.33.47

Поступила в редакцию 28 апреля 2023 г. Окончательный вариант – 31 октября 2023 г.

---

# Laser printing of certain pixels of graphene nanoribbons

M.S. Komlenok<sup>1</sup>, P.V. Fedotov<sup>1</sup>, P.A. Pivovarov<sup>1</sup>, V.I. Konov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,  
119991, Moscow, Russian Federation, Vavilova str. 38

## Abstract

A possibility of laser printing of graphene nanoribbon pixels while preserving the integrity of the structure and shape on the silicon substrate in accordance with the irradiated laser spot is demonstrated. To provide the transfer, a target consisting of a transparent sapphire plate and an absorbing thin titanium film (500 nm thick) coated with a film consisting of graphene nanoribbons is irradiated with a KrF excimer laser ( $\lambda = 248$  nm,  $\tau = 20$  ns). Optimal conditions for laser irradiation are determined and a technique is developed for transferring a carbon nanomaterial from a growth nickel surface to a titanium film aimed at creating stronger bonds between the nanoribbons. Raman spectroscopy confirms the preservation of structural features of the synthesized atomically precise 7-atoms-wide graphene nanoribbons with an armchair edge during laser transfer.

**Keywords:** graphene nanoribbons, laser-induced forward transfer, carbon nanomaterials, excimer lasers.

**Citation:** Komlenok MS, Fedotov PV, Pivovarov PA, Konov VI. Laser printing of certain pixels of graphene nanoribbons. *Computer Optics* 2024; 48(3): 371-375. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1331.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation under project no. 18-72-10158. The authors thank A.F. Popovich for deposition of titanium films.

---

## 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](mailto:komlenok@nsc.gpi.ru)

**Pavel Vladimirovich Fedotov**, 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: synthesis of different carbon nanomaterials, luminescence spectroscopy, Raman spectroscopy, and nanophotonics. E-mail: [fedotpavel@mail.ru](mailto:fedotpavel@mail.ru)

**Pavel Aleksandrovich Pivovarov**, 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 radiation interaction with matter, nonlinear optics, atomic force microscopy, carbon nanomaterials. E-mail: [p\\_pivovarov@hotmail.com](mailto:p_pivovarov@hotmail.com)

**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](mailto:vik@nsc.gpi.ru)

---

Received April 28, 2023. The final version – October 31, 2023.

---