

Экспериментальная демонстрация микрообработки поверхности полистирола с использованием фотонного крючка

О. В. Минин⁺, И. В. Минин^{+*1)}

⁺Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

* Филиала Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН
“Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники”, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 17 мая 2024 г.

После переработки 7 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

При лазерной микроперфорации диэлектрических материалов получение кратеров, которые имеют изменяющиеся в продольном и поперечном направлениях характеристики, наталкивается на существенные проблемы. В этой работе мы предлагаем метод микроструктурирования полимерных материалов на примере полистирола на основе лазерных фотонных крючков с использованием маломощного и недорогого лазера непрерывного действия. Для формирования фотонного крючка было использовано оптическое волокно с коническим окончанием с нарушенной симметрией. Результаты экспериментов демонстрируют возможность получения криволинейных микрократеров, форма которых в полимерной подложке зависит от мощности лазерного излучения.

DOI: 10.31857/S1234567824140118, EDN: XBVMUU

1. Введение. Современная фотоника, наряду с традиционными лазерными технологиями обработки материалов включает в себя и новые подходы для создания материалов с требуемыми приповерхностной структурой и/или составом с новыми функциональными и конструктивными характеристиками. При этом прямая лазерная обработка материалов в части нано- (и микро-) перфорации, из-за простоты ее реализации, не требующей химической производственной среды [1–3], претерпела важные изменения с появлением структурированных лазерных пучков. Появляется потенциальная возможность создания управляемой топологии в приповерхностном слое твердого тела, что определяет физико-химические свойства модифицированных таким образом материалов и пленок. Растущая потребность в лазерно модифицированных материалах требует повышения потенциала существующего арсенала методов и их функциональных возможностей для максимально полного контроля над новыми и модифицированными материалами путем использования структурированных локализованных полей.

Для наноструктурирования диэлектриков с использованием популярной технологии нано- и микроперфорации часто используются сверхкороткие лазерные импульсы [4–8]. В [9, 10] была продемонстрирована резка листов стекла на основе структуриро-

ванных пучков Бесселя–Гаусса. Используя фемтосекундный лазер, облучающий пленку оксид-металлоксид, на которой была выгравирована субволновая кольцевая апертура, авторы [11] генерировали Бессель пучки для получения кратеров в кремнии. Получение отверстий в материале на основе использования пространственно-временной интерференции двух вихревых пучков Бесселя с разными топологическими зарядами и разными несущими частотами было недавно продемонстрировано в [12].

Однако особой проблемой при лазерной нано- и микроперфорации материалов является обработка структур внутри образца, которые имеют изменяющиеся в продольном и поперечном направлениях характеристики. Это становится особенно трудным, когда желаемые пространственные характеристики кратера имеют микронный или даже субволновой (субмикронный) масштаб. Получить изогнутый кратер при абляции материала возможно путем смещения образца во время воздействия лазерного излучения, однако такой метод достаточно трудоемкий [13]. Для получения образцов с закругленной кромкой были применены пучки Эйри [14, 15]. Для формирования пучка Эйри на расстояниях, на несколько порядков превышающих расстояние Гаусса–Рэлея, использовалась 2f-оптическая система, располагаемая после кубической фазовой маски. В этих исследованиях вследствие абляции [16, 17] удалось добиться изогнутого профиля кратера в алмазе, кремнии и

¹⁾e-mail: prof.minin@gmail.com

боросиликатном стекле [18]. Использование лазеров непрерывного излучения совместно с оптикой, формирующей структурированные пучки (Бессель пучки), также позволило формировать цилиндрические кратеры в кварцевом стекле [19].

Однако генерация структурированных самоускоряющихся пучков семейства Эйри применительно к микроструктурированию поверхности образцов обычно достигается с помощью достаточно сложных, громоздких и дорогих технологий [20–22]. А использование фемтосекундных лазерных установок зачастую проблематично ввиду их относительной дороговизны. Более того, структурированным пучкам семейства Эйри и Бесселя присущ недостаток, связанный с умеренным повреждением структурируемой поверхности в области боковых лепестков [14, 23]. Поэтому существует потребность в реализации микро- наноструктурирования материалов с использованием обычного лазера непрерывного действия. Поскольку пространственное разрешение обрабатываемых структур зависит от плотности мощности и распределения интенсивности лазерного пучка, остро сфокусированный лазерный луч обеспечивает более прецизионную обработку поверхности структур.

Попытки создать криволинейные кратеры под действием лазерного излучения были предприняты в [24, 25]. Для этого использовалось механическое смещение сфокусированного пятна лазера на дне кратера для контроля пространственного положения локальной области абляции стекла. Однако кривизна кратера ограничена и определяется как соотношением геометрических параметров самого кратера (глубина, диаметр), так и диаметром сфокусированного лазерного пучка. В то же время, вследствие фундаментального дифракционного предела, наноразмерное структурирование образцов с использованием обычной лазерной системы непрерывного действия остается труднореализуемой обычными средствами. С другой стороны, субдифракционный размер пятна лазера непрерывного излучения и высокую плотность мощности в нем можно создать за счет генерации лазерных фотонных наноструй (ФНС). В мезотронике [26] наноструктурирование поверхности кремнезема на основе структурированных локализованных пучков с полушириной порядка 0.3 длины волны, формируемой сферическими диэлектрическими частицами размером 0.5 мкм, облучаемых эксимерным K₂F-лазером с длиной волны 248 нм, было продемонстрировано в [27]. Позднее такой распространяющийся луч, формируемый в теневой части сферической мезоразмерной частицы, в котором вся

падающая мощность сосредоточена в локализованном пучке с диаметром, меньшем половины длины волны, получил название фотонной струи [28]. Экспериментальные исследования показали, что применение фотонных струй для микро- наноструктурирования материалов может значительно улучшить разрешение литографии [29–33]. Однако поскольку микросферы находятся в непосредственном контакте с подложкой, последняя загрязняется, при этом диэлектрическими микрочастицами трудно манипулировать. Поэтому важно разработать и исследовать простой и гибкий метод (желательно без микросфер – мезоразмерных частиц) для генерации локализованных структурированных полей в виде фотонных наноструй, включая фотонный крючок, и прямой лазерной микрообработки на их основе.

В [34] было продемонстрировано, что микролинза различного профиля, размещенная на торце оптического волокна, позволяет обеспечить лазерное субмикронное перфорирование образца. В [35] была продемонстрирована возможность генерации фотонной струи вблизи оптического волокна с интегрированными диэлектрическими сферическими частицами. Позднее, были исследованы различные типы наконечников оптических волокон для получения фотонных струй, в том числе, для лазерного наноструктурирования различных материалов [36]. Однако все указанные выше методы не позволяли реализовать криволинейную форму кратеров в материале. С другой стороны, в отличие от классических самоускоряющихся пучков семейства Эйри, фотонный крючок может быть создан с помощью простой компактной мезоразмерной диэлектрической оптической частицы. А поле фотонного крючка сочетает в себе черты как фотонной струи, так и различного типа самоускоряющихся пучков, включая пучки семейства Эйри [37–39]. Более того, в пучках типа фотонный крючок отсутствуют боковые лепестки, присущие пучкам типа Бессель и Эйри [37], что практически исключит повреждение структурируемой поверхности вне области основного лепестка. В [40] мы впервые продемонстрировали новую концепцию лазерного скальпеля с оптическим крючком на основе оптоволокна. Субволновой фотонный крючок был сформирован вблизи профилированного оптического волокна с асимметричным облучением. Для этого использовался экран внутри оптического волокна со стороны облучения сферической частицы. Однако такой подход встречает определенные технологические трудности в практической реализации.

В то же время, насколько нам известно, до сих пор не было предложено ни одного исследования, де-

монстрирующего возможность использования структурированного пучка типа фотонный крючок для получения криволинейных кратеров в оптически прозрачных диэлектриках.

В этой работе мы экспериментально демонстрируем прямое [3] лазерное микро-структурирование полистироловой пленки с использованием волоконно-оптического зонда с усеченным конусом с непараллельными основаниями [41], отличающееся простотой и дешевизной реализации и позволяющим формировать криволинейные кратеры. Эффект наноструктурирования поверхности материала в виде криволинейного кратера на основе структурированных полей типа фотонный крючок, включающего в себя свойства ФНС и самоускоряющихся пучков, был получен впервые без использования микросфер (мезоразмерных частиц), ранее никогда не изучался, и в этом отношении наши исследования являются абсолютно новыми.

2. Формирование фотонного крючка. Одномодовое кварцевое волокно диаметром 125 мкм сначала растягивалось до диаметра около 50 мкм аналогично [42]. Изготовление волоконно-оптического зонда с коническим окончанием с нарушенной симметрией (так называемый усеченный конус с непараллельными основаниями – рис. 1) состояло из двух этапов – изготовление осесимметричного конического окончания и формирование скошенного окончания на вершине конуса.

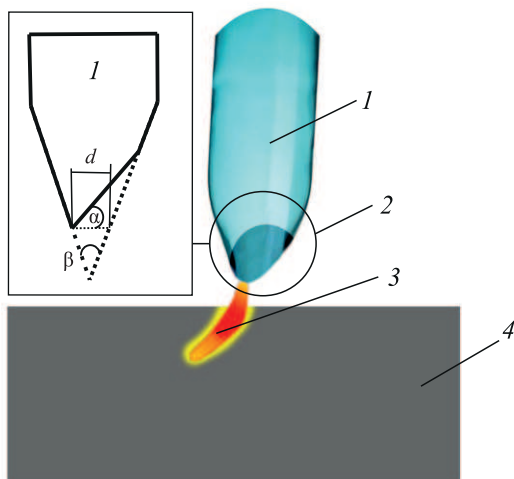


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема эксперимента и геометрия задачи. 1 – оптическое волокно; 2 – коническое окончание с нарушенной симметрией; 3 – фотонный крючок; 4 – полистирол. На вставке слева показана геометрия конического окончания оптического волокна: α – угол усечения конического окончания, β – угол конуса и d – диаметр усеченного конического зонда

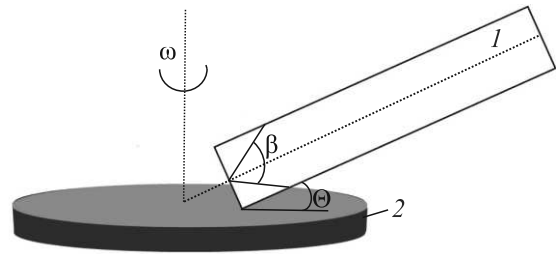


Рис. 2. Формирование конического окончания оптического волокна: 1 – оптическое волокно; 2 – шлифовальный диск; Θ – угол полировки; β – угол конического окончания; $\beta = 2\theta$

Для изготовления окончания волокна в виде осесимметричного конуса использовалась механическая обработка с помощью вращающегося шлифовального диска (рис. 2). В нашем случае скорость вращения шлифовального диска составляла около $\omega \sim 50$ оборотов в минуту, поверхность которого периодически смачивалась. Как показали эксперименты, увеличение скорости вращения шлифовального диска приводит к более шероховатой поверхности конического окончания. Более подробно аналогичная технология механического изготовления конического окончания волокна описана в [43, 44]. После изготовления конического окончания волокна на нем по такой же технологии формировался асимметричный скос (вставка на рис. 1) для получения усеченного конуса с непараллельными основаниями. Одномодовое оптическое волокно соединялось с коническим окончанием с нарушенной симметрией. Диаметр, угол усечения и угол раствора конического зонда составляют около $d = 22$ мкм, $\alpha = 33^\circ$, и $\beta = 11^\circ$. Заметим, что при указанных углах конического окончания стоячих волн в оптическом волокне согласно [45] не образуется.

В качестве источника излучения использовался термостабилизированный лазер красного спектра на длину волны 0.671 микрон. В качестве образца, как уже указывалось, был выбран полистирол (показатель преломления 1.5847, коэффициент поглощения $\sim 0.12530 \text{ см}^{-1}$ [46]) толщиной 150 микрон, для которого лазерная абляция происходит при температурах, значительно ниже температуры разложения [47]. Измеренная шероховатость поверхности полированного полистирола составляла менее 30 нм.

3. Экспериментальные результаты и обсуждения. Из-за наличия окончания оптического волокна с нарушенной симметрией выходной лазерный луч имеет сильно локализованную криволинейную форму (фотонный крючок – рис. 3а). Визуализация фотонного крючка осуществлялась с помощью

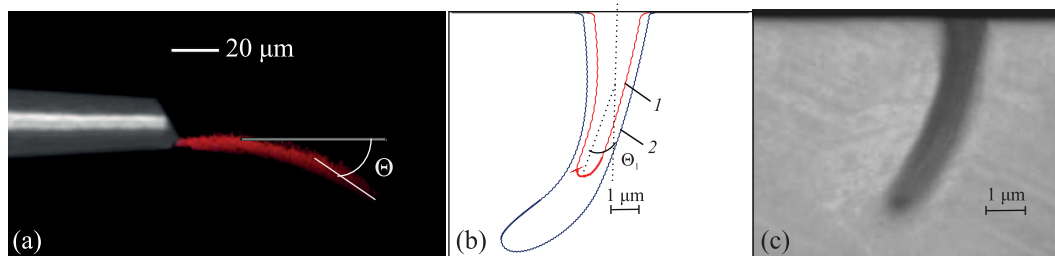


Рис. 3. (Цветной онлайн) (а) – Оптическое волокно с нарушенной симметрией окончания (рис. 1) и формируемый фотонный крючок. (б) – Профили поперечного сечения микрократеров для двух различных мощностей лазера: 1 – 40 и 2 – 80 мВт, соответственно. (с) – Фотография микрократера при мощности лазера 40 мВт

оптического сканирующего микроскопа аналогично [48], при этом все системы визуализации были расположены в темной комнате с контролируемым освещением. В данном случае эффект формирования фотонного крючка аналогичен дифракции на краю прямоугольной фазовой пластинке при освещении линейно поляризованной плоской волной [37]. Профиль области локализации лазерного излучения, формируемого окончанием конического зонда с нарушенной симметрией, измерялся с помощью сканирующего щелевого оптического профилометра [49]. Измеренные значения ключевых [37] параметров фотонного крючка составили: фокусное расстояние (расстояние от плоскости окончания оптического волокна до области с максимальной интенсивностью поля) около 15.5 мкм при угле усечения конического зонда около $\alpha = 33^\circ$, угол отклонения сфокусированного пучка $\theta = 14.8^\circ$, ширина пучка в области максимальной интенсивности поля на полувысоте составила примерно 1.6 мкм.

Связь между глубиной и формой абляционного криволинейного кратера и мощностью лазера была исследована экспериментально. Коническая часть волокна была расположена вертикально над поверхностью мишени. Полистироловая пленка была расположена на трехосном коммерчески доступном моторизованном столике, который контролируемо перемещался в трех направлениях с разрешением около 100 нм [48]. На рис. 3б показаны профили поперечного сечения микрократеров при различных мощностях лазера. Глубина и ширина кратера увеличивается при увеличении мощности лазера от 40 мВт до 80 мВт (пороговое значение мощности для получения кратера в полистироле составляет немного менее 10 мВт [50]). Время воздействия структурированного фотонного крючка, формируемого непрерывным лазерным излучением, на преграду составляло 6–8 с.

Для определения границ полученного кратера, показанного на рис. 3б, использовалась методика Канны [51]. Видно, что в разрезе кратер имеет криво-

линейную форму, причем ширина кратера и его глубина увеличиваются при увеличении мощности лазера. Так, общая глубина кратера увеличивается с 6.1 до 8.9 мкм при увеличении мощности лазера с 40 до 80 мВт. Отношения глубины кратера к входной ширине отверстия при мощности лазера 40 и 80 мВт оцениваются в 3.2 и 3.6 раза соответственно. Угол отклонения оси кратера (рис. 3б) составляет примерно $\theta_1 = 13.7^\circ$ при мощности лазера 40 мВт и $\theta_1 = 15^\circ$ при мощности лазера 80 мВт.

4. Заключение. В этой работе мы показали, как структурированные пучки типа фотонный крючок можно использовать для лазерной обработки диэлектрических материалов для получения криволинейных микрократеров. Представленный выше подход к нано- и микро- структурированию диэлектрических материалов применим при условии, что зона термического воздействия меньше кривизны кратера (пучка), поскольку за абляцию ответственно напряжение, вызванное тепловым расширением материала полимера [52]. Предложенный метод имеет большой потенциал в производстве новых материалов на полимерной основе благодаря простоте его реализации с помощью обычной лазерной системы непрерывного действия. Мы полагаем, что область применения рассмотренного эффекта будет представлять интерес в различных технологических областях, таких как обработка материалов и прецизионных фотонных компонентов.

Исследование поддержано программой развития Томского политехнического университета.

Финансирование работы. Никаких грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

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

1. Z. Lin and M. Hong, *Ultrafast Science*, Article ID **9783514**, 22 (2021).
2. Y. Jia and F. Chen, *APL Photonics* **8**, 090901 (2023).

3. И. Н. Завестовская, Квантовая электроника **40**(11), 942 (2010).
4. R. Gattass and E. Mazur, Nat. Photonics **2**, 219 (2008).
5. А. М. Шахов, А. А. Астафьев, В. А. Надточенко, Письма в ЖЭТФ **109**(5), 294 (2019).
6. K. Xu, L. Huang, and S. Xu, Optica **10**, 97 (2023).
7. A. Ghosal, O. J. Allegre, Z. Liu, and G. Jones, Results in Optics **5**, 100179 (2021).
8. I. Mirza, N. Bulgakova, J. Tomáščík, V. Michalek, O. Haderka, L. Fekete, and T. Mocek, Sci. Rep. **6**, 39133 (2016).
9. M. Jenne, D. Flamm, K. Chen, M. Schafer, M. Kumkar, and S. Nolte, Opt. Express **28**, 6552 (2020).
10. M. Sakakura, Y. Lei, L. Wang, and P. Kazansky, Light Sci. Appl. **9**, 15 (2020).
11. Y.-Y. Yu, C.-K. Chang, M.-W. Lai, L.-S. Huang, and C.-K. Lee, Appl. Opt. **50**(34), 6384 (2011).
12. G. Kontenis, D. Gailevičius, N. Jiménez, and K. Staliunas, Phys. Rev. Applied **17**, 034059 (2022).
13. H. Hidai, Y. Kuroki, S. Matsusaka, A. Chiba, and N. Morita, Precision Engineering **46**, 96 (2016).
14. A. Mathis, F. Courvoisier, L. Froehly, L. Furfaro, M. Jacquot, P. A. Lacourt, and J. M. Dudley, App. Phys. Lett. **101**, 071110 (2012).
15. F. Courvoisier, R. Stoian, and A. Couairon, Optics and Laser Technology **80**, 125 (2016).
16. F. V. Bunkin, N. A. Kirichenko, B. S. Luk'yanchuk, Phys.-Uspekhi **25**, 662 (1982).
17. С. А. Ромашевский, С. И. Ашитков, М. Б. Агранат, ТВТ **56**(4), 609 (2018).
18. D. Sohr, J. U. Thomas, and S. Skupin, Opt. Lett. **46**, 2529 (2021).
19. H. Hidai, N. Saito, S. Matsusaka, A. Chiba, and N. Morita, Appl. Phys. A **122**, 277 (2016).
20. P. Polynkin, M. Kolesik, J. V. Moloney, G. A. Siviloglou, and D. N. Christodoulides, Science **324**, 229 (2009).
21. G. A. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu, and D. N. Christodoulides, Phys. Rev. Lett. **99**, 213901 (2007).
22. C. Ungaro and A. Liu, Optics & Laser Technology **144**, 107398 (2021).
23. Y. Matsuoka, Y. Kizuka, and T. Inoue, Appl. Phys. A **84**, 423 (2006).
24. H. Hidai, Y. Kuroki, S. Matsusaka, A. Chiba, and N. Morita, Precision Engineering **46**, 96 (2016).
25. K. Miyakoda, K. Sunayama, K. Sakamoto, D. Tokunaga, H. Hidai, and S. Matsusaka, Precision Engineering **81**, 1 (2023).
26. I. V. Minin and O. V. Minin, Photonics **9**, 762 (2022).
27. Y. F. Lu, L. Zhang, W. D. Song, Y. W. Zheng, and B. S. Luk'yanchuk, JETP Lett. **72**(9), 457 (2000).
28. B. S. Luk'yanchuk, R. Paniagua-Dominguez, I. V. Minin, O. V. Minin, and S. Wan, Opt. Mater. Express **7**, 1820 (2017).
29. E. Mcleod and C. Arnold, Nat. Nanotechnol. **3**, 413 (2008).
30. А. А. Астафьев, А. М. Шахов, О. М. Саркисов, В. А. Надточенко, Квантовая электроника **43**(4), 361 (2013).
31. C. Qu, C. Zhu, and E. C. Kinzel, Opt. Express **28**, 39700 (2020).
32. Y. Elkarkri, X. Li, B. Zeng, Z. Lian, J. Zhou, and Y. Wang, Nanotechnology **32**, 145301 (2021).
33. S. Surdo, M. Duocastella, and A. Diaspro, Micromachines **12**, 256 (2021).
34. S. Yakunin and J. Heitz, Journal of Laser Micro/Nanoengineering **6**(3), 180 (2011).
35. L. Han, Y. Han, J. Wang, G. Gouesbet, and G. Grehan, Opt. Lett. **39**, 1585 (2014).
36. R. Pierron, J. Zelgowski, P. Pfeiffer, J. Fontaine, and S. Lecler, Opt. Lett. **42**, 2707 (2017).
37. O. V. Minin and I. V. Minin, *The Photonic Hook: From Optics to Acoustics and Plasmonics*, Springer, Cham (2021).
38. A. S. Ang, I. V. Minin, O. V. Minin, S. Sukhov, and A. S. Shalin, Sci. Rep. **8**, 2029 (2018).
39. K. Dholakia and G. D. Bruce, Nat. Photonics **13**, 229 (2019).
40. I. V. Minin, O. V. Minin, Y.-Y. Liu, V. V. Tuchin, and C.-Y. Liu, J. Biophotonics **14**(2), e202000342 (2021).
41. И. В. Минин, О. В. Минин, Патент РФ 2 803 933. Опубликовано: 22.09.2023 Бюл. # 27.
42. T. Hajj, S. Marbach, P. Pfeiffer, P. Montgomery, S. Lecler, and M. Flury, Opt. Lett. **48**, 2222 (2023).
43. H. Deng, C. Qi, X. Zhang, and L. Yuan, J. Light. Technol. **33**(12), 2486 (2015).
44. J. Petrovic, F. Lange, and D. Hohlfeld, J. Neural Eng. **20**, 036007 (2023).
45. S.-S. Wang, J. Fu, M. Qiu, K.-J. Huang, Z. Ma, and L.-M. Tong, Opt. Express **16**, 8887 (2008).
46. N. Sultanova, S. Kasarova, and I. Nikolov, Acta Phys. Pol. A **116**, 585 (2009).
47. R. S. Kappes, F. Schönfeld, C. Li, A. A. Golriz, M. Nagel, T. Lippert, H.-J. Butt, and J. S. Gutmann, SpringerPlus **3**, 489 (2014).
48. I. V. Minin, O. V. Minin, C.-Y. Liu, H.-D. Wei, and Y. Geints, Opt. Lett. **45**, 4899 (2020).
49. M. Mylonakis, S. Pandey, K. G. Mavrikakis, G. Drougakis, G. Vasilakis, D. G. Papazoglou, and W. von Klitzing, Appl. Opt. **57**, 9863 (2018).
50. K. S. Tiaw, M. H. Hong, S. H. Teoh, J. Alloys Compd. **449**(1-2), 228 (2008).
51. P. Bao, L. Zhang, and X. Wu, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. **27**, 1485 (2005).
52. S. Ravi-Kumar, B. Lies, H. Lyu, and H. Qin, Procedia Manufacturing **34**, 316 (2019).