09

Фотонный крючок на основе целенаправленно нарушенных пространственных симметрий частицы или облучающего излучения

© О.В. Минин, И.В. Минин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
E-mail: prof.minin@gmail.com

Поступило в Редакцию 14 января 2026 г.
В окончательной редакции 14 февраля 2026 г.
Принято к публикации 14 февраля 2026 г.

Показано, что фотонный крючок можно создать относительно простым и экономически эффективным способом, используя неоднородные (patchy) мезомасштабные частицы с целенаправленно нарушенными пространственными симметриями частицы или облучающее излучение. Продемонстрирована эквивалентность различных схем генерации фотонного крючка.

Ключевые слова: фотонный крючок, локализация поля, частица с нарушенной симметрией.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.10.62738.20625

Микроскопия, основанная на мезомасштабных частицах, зарекомендовала себя как перспективный инструмент для преодоления фундаментального дифракционного предела. В то же время низкий контраст изображения в данном случае может быть преодолен, например, с помощью косого освещения с использованием так называемого фотонного крючка (ФК), открытого в 2015 г. [1,2]. ФК, представляющий собой разновидность фотонной струи [3], — новый тип искусственно созданного искривленного локализованного пучка ближнего поля с радиусом кривизны, как правило, меньшим длины волны. Принцип действия основан на комбинации эффектов интерференции волн и разности фазовых скоростей [4]. ФК генерируется, когда свет проходит через мезомасштабную диэлектрическую частицу с целенаправленно нарушенной симметрией (Янус-частица [5]) в ее форме или структуре материала [4]. Простейший вариант ФК был реализован на основе комбинации клиновидной призмы и кубоида [1,2,4]. В целом формирование фотонного крючка частицами с различной природой асимметрии (формы, показателя преломления и структурированного облучения) было изучено довольно подробно и обобщено в [4]. Явление ФК было экспериментально подтверждено в терагерцевом и оптическом диапазонах, акустике, а также в случае фокусировки поверхностных плазмонных волн [4].

В то же время следует заметить, что потенциальные возможности Янус-частиц на основе комбинации клиновидной призмы и кубоида довольно широки, но еще недостаточно представлены в литературе. Так, в указанных выше работах использовалась частица при падении плоского волнового фронта со стороны ее клиновидной части. А ФК формировался в теневой части частицы вдоль направления падения излучения [1,2,4], т. е. фазовая модуляция освещающей волны проводилась вдоль направления распространения излучения. Однако, как показали дополнительные исследования, ФК формируется и в случае падения излучения перпендикулярно основанию ограниченно симметричной Янус-частицы. Но рассмотрение этого случая выходит за рамки настоящей работы.

Структурированное облучение путем частичного блокирования падающего излучения симметричной частицы, формирующей ФК, было предложено в [6,7]. Позже (в 2022 г.) было продемонстрировано [8], что локализованное поле в форме фотонного крючка может быть получено путем частичного нанесения металлической алюминиевой пленки [9,10] на мезоразмерные диэлектрические сферу или цилиндр. Такая мезоразмерная диэлектрическая частица относится к типу пятнистых частиц, которые представляют собой частицы с поверхностным анизотропным рисунком (патчи [10]) или ограниченно симметричной внешней формой [11–13]. Составные патч-частицы с неоднородной структурой могут обеспечить дополнительные степени контроля локализации электромагнитного поля. В таких мезоразмерных частицах пленка, нанесенная на поверхность частицы или расположенная вблизи освещенной поверхности частицы [7], действует как апертурная диафрагма, блокирующая часть падающего пучка, образуя ФК. Однако сравнительный анализ указанных выше конфигураций, приводящих к близкому результату, до сих пор не проводился.

Далее мы покажем, что, с нашей точки зрения, частичное блокирование излучения с помощью экрана, расположенного вблизи освещенной поверхности частицы, и микрочастицы с патчами являются по сути эквивалентными решениями, поскольку частица „не знает“ природу падающего структурированного излучения. С этой позиции частицу с внешним экраном для формирования ФК можно рассматривать как патч-частицу. Мы покажем, что ФК с близкими характеристиками могут быть получены с помощью диэлектрических патч-частиц, частично блокирующих падающий волновой фронт либо частично

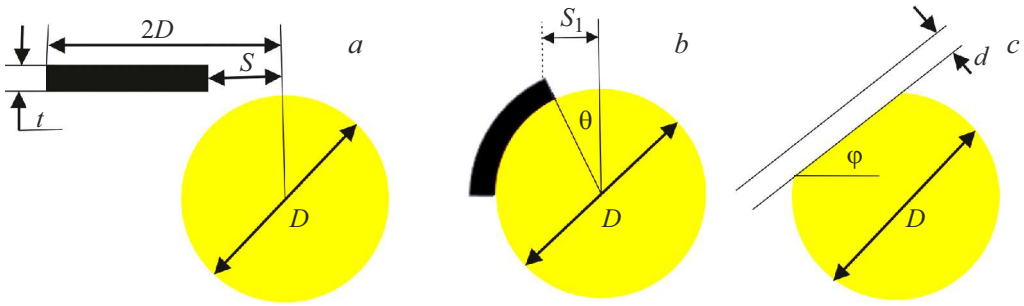

Рис. 1. Двумерное сечение исследуемых ограниченно симметричных мезомасштабных диэлектрических цилиндров: частичное блокирование падающего плоского волнового фронта (a), частичное покрытие тонкими металлическими/диэлектрическими пленками (b) и деформация поверхности (c). Рисунки приведены не в масштабе. Частица освещается сверху вниз.

Таблица 1. Основные параметры ФК

Параметр	Экран (рис. 1, a)	Al-слой (рис. 1, b)	Si-слой (рис. 1, b)	Скос 1 (рис. 1, c)	Скос 2 (рис. 1, c)
Длина ФК, λ [7]	6.4	6.34	6.42	6.59	5.38
Угол отклонения, deg [7]	9.8	6.6	5.6	13.5	12.5
Полуширина, λ	0.8	0.72	0.71	0.63	0.63
$I_{\max}$	5.6	4.6	4.0	6.0	5.8

Примечание. Полуширина определялась в точке максимальной интенсивности поля вдоль ФК, $I_{\max}$ — значение максимальной интенсивности поля вдоль ФК, нормированной на интенсивность падающего на частицу поля, скос 1 — $d = 0.25\lambda$, $\varphi = 10^\circ$, скос 2 — $d = 0.25\lambda$, $\varphi = 20^\circ$.

покрытых металлическими/диэлектрическими пленками, или посредством целенаправленной деформации поверхности. С учетом ограничений на объем публикации далее мы сосредоточились в основном на кривизне фотонного крючка как на его ключевом параметре [2,4].

Мы рассматриваем двумерную модель частицы (микроцилиндр). На рис. 1 представлены схематические изображения двумерного сечения исследуемых моделей. Толщина плоского алюминиевого экрана (рис. 1, a) составляла 200 nm ($\sim 0.5\lambda$), как и толщина покрытия верхней поверхности цилиндра пленками Al или Si (рис. 1, b). Для расчета 2D-моделей, показанных на рис. 1, мы используем метод конечных элементов, реализованный в известном пакете COMSOL. Все счетное пространство ограничивалось системой идеально согласованных по поглощению слоев. В качестве примера был выбран цилиндр диаметром $D = 5\,\mu$m (или $\sim 12\lambda$, параметр размера Ми $q \sim 40$), изготовленный из PDMS (полидиметилсилоксан) с показателем преломления $n = 1.41$. Окружающая среда — воздух. В качестве пленок мы использовали Al ($n = 0.50047 + 4.89788i$) или Si ($n = 5.4376 + 0.34209i$) [14] (рис. 1, b) на длине волны $\lambda = 405$ nm. Начало координат — в центре цилиндра.

Моделирование влияния частичной экранировки падающего излучения (рис. 1, a) показало, что можно контролировать кривизну локализованного поля, регулируя относительное положение и размеры внеосевого освещающего луча и диэлектрической частицы. Увеличение значения параметра S (расстояние от оси симметрии частицы до края экрана) приводит к увеличению кривизны фотонного ФК. Однако это сопровождается уменьшением его длины [4,7].

Аналогичная тенденция наблюдается для частицы, верхняя поверхность которой покрыта пленкой Al или Si (рис. 1, b). В целом частичное покрытие цилиндра диэлектриком с высоким показателем преломления аналогично металлическому покрытию. Влияние параметра S_1 (расстояние от оси симметрии частицы до края экрана вдоль внешней поверхности частицы) на ФК аналогично действию плоского экрана с параметром S (рис. 1, a). Однако все же наблюдаются незначительные различия (см. рис. 2, b, где изображен профиль ФК вдоль направления падения излучения). На рис. 2 отчетливо видна точка перегиба локализованного пучка, характерная для ФК и ненаблюдаемая, например, в пучках семейства Эйри [4], а также субволновая кривизна локализованного поля, являющаяся одним из ключевых отличительных признаков ФК [2,4].

В табл. 1 представлены основные сравнительные характеристики формируемых ФК. Геометрический параметр, характеризующий экранировку освещающего поверхность частицы излучения (рис. 1), приведен в табл. 2. На основе данных рис. 2 и результатов моделирования можно сделать следующий вывод. Параметры ФК для плоского внешнего экрана (рис. 1, a) и металлической пленки, частично нанесенной на цилиндр (рис. 1, b), полностью идентичны при одинаковой величине экранировки падающего излучения. Для кремниевого покрытия угол покрытия частиц должен быть немного больше $\theta = 50^\circ$ из-за различий в показателях

Таблица 2. Геометрическая экранировка падающего излучения

Параметр	Значение $2S/D$ (рис. 1, a) или $2S_1/D$ (рис. 1, b)	Номер рисунка
$S = 2700\lambda$	0.48	1, a
$S = 3500\lambda$	0.64	1, a
$S = 5000\lambda$	0.8	1, a
$\theta = 30^\circ$	0.5	1, b
$\theta = 40^\circ$	0.64	1, b
$\theta = 50^\circ$	0.77	1, b

преломления металла и кремния. В последнем случае степень аподизации освещающего пучка несколько возрастает, что, однако, незначительно снижает энергетическую эффективность формирования ФК. С другой стороны, интегральные характеристики ФК могут быть идентичными для различных типов экранов, расположенных перед частицей или нанесенных на ее поверхность.

Наконец, кратко рассмотрим однородную частицу с односторонним срезом (рис. 1, c), т.е. цилиндр с вырезанной частью освещаемой поверхности. В наших симуляциях мы варьировали как толщину срезанной части частицы d, так и угол наклона среза φ.

Согласно результатам моделирования, неглубокие срезы (например, $d \sim 0.25\lambda$) демонстрируют величины кривизны луча более близкие к значениям для ФК на основе частицы с внешним экраном (табл. 1, рис. 1, a). Кривизна крючка, как правило, сохраняется при меньших углах, в то время как более глубокие срезы, как правило, смещают ФК (рис. 2). Кривизна ФК увеличивается с увеличением асимметрии частицы. Увеличение глубины среза приводит к расхождению значений кривизны крючка со случаем „эталонной“ версии частицы с внешним экраном (рис. 1).

Очевидно, что достижение полного сходства характеристик фотонного крючка, образованного частицей с экраном и частицей с удаленным сегментом, является сложной задачей. Однако комплексный подход может решить эту проблему. Например, на рис. 3 показаны характеристики фотонного крючка для частицы с удаленным сегментом и показателем преломления материала, уменьшенным до $n = 1.3$, что демонстрирует эту тенденцию. Заметим, что представленные выше сравнительные характеристики ФК являются результатом предварительной оптимизации каждой из конфигураций, обеспечивающей наилучшее совпадение с „эталонным“ вариантом (рис. 1, a).

Достижения в мезотронике открывают новые перспективы в реализации ФК на основе неоднородных частиц. Можно отметить, что концепция ФК уже нашла успешное экспериментальное подтверждение и применение для оптического захвата и селективного манипулирования биологическими объектами [4], а также при нано- и микроструктурировании поверхностей путем создания искривленных кратеров. Заметим, что экспериментальное подтверждение механизма формирования ФК на основе частицы с внешним экраном (рис. 1, a) подробно описано в [4,7], частицы с нанесенной на ее поверхность металлической пленкой (рис. 1, b) — в [8]. Формирование ФК на основе микроцилиндра с удаленным сегментом (рис. 1, c), насколько нам извест-

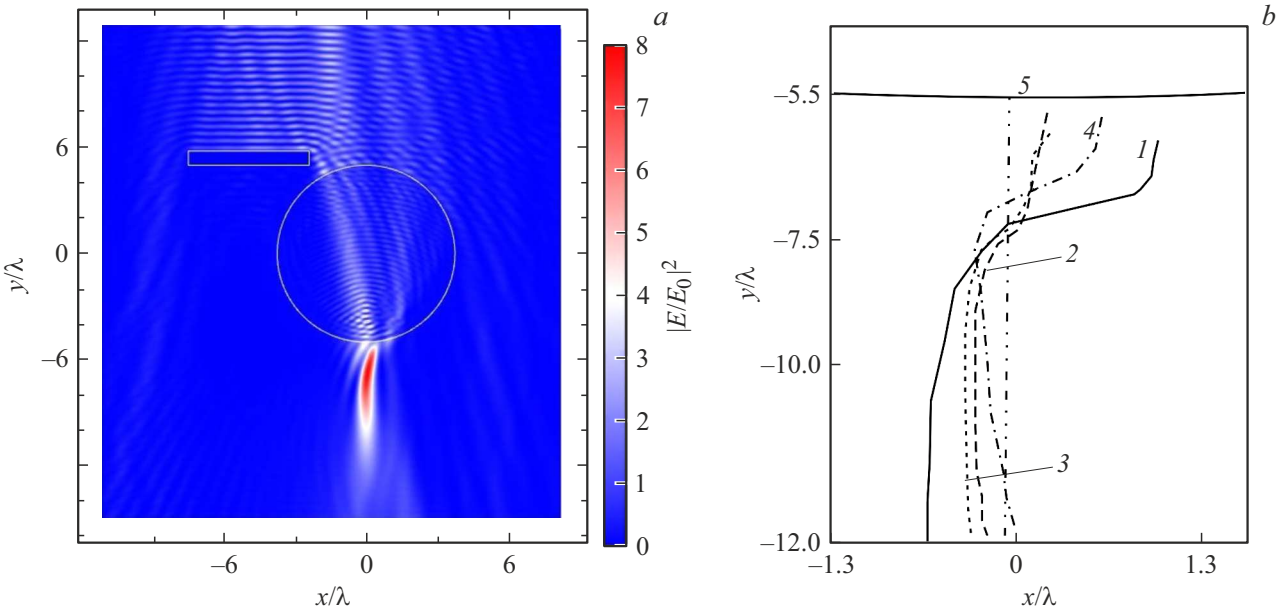

Рис. 2. Формирование фотонного крючка на основе целенаправленно нарушенных пространственных симметрий частицы. a — распределение интенсивности поля для конфигурации, приведенной на рис. 1, a; b — распределение максимума интенсивности поля вдоль ФК: *1* — $S = 2700\lambda$ (рис. 1, a), *2* — $\theta = 30^\circ$ (Al, рис. 1, b), *3* — $\theta = 30^\circ$ (Si, рис. 1, b), *4* — $S = 3500\lambda$ (рис. 1, a), *5* — теневая граница цилиндрической частицы.

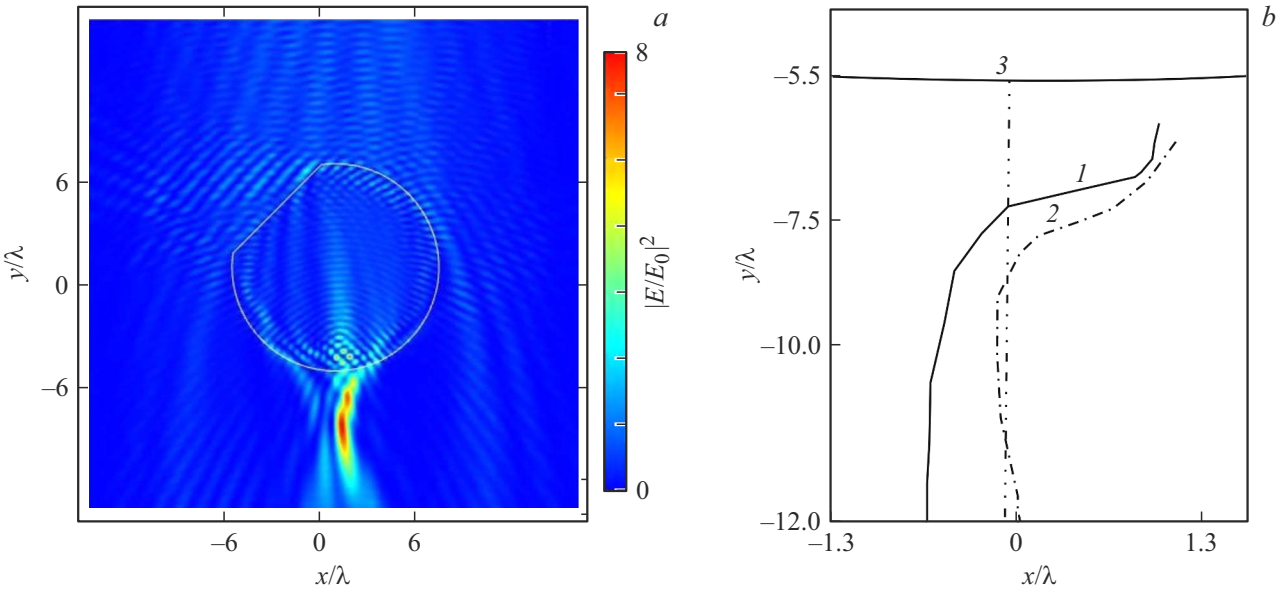

Рис. 3. Формирование фотонного крючка цилиндром с направленно нарушенной симметрией. *a* — распределение интенсивности поля для частицы конфигурации, представленной на рис. 1, *c*, $n = 1.3$, $d \sim 1.2\lambda$; *b* — распределение максимума интенсивности поля вдоль ФК: *1* — $S = 3500\lambda$, $n = 1.41$ (рис. 1, *a*), *2* — $n = 1.3$, $d \sim 1.2\lambda$ (рис. 1, *c*), *3* — теневая граница частицы.

но, рассмотрено впервые, и такая частица может быть практически реализована одним из известных методов (например, [15]).

В настоящей работе было показано, что различные типы ограниченно симметричных Янус-частиц, включая частицы с экраном, расположенным перед или на их поверхности, действуют как диафрагма, блокирующая часть падающего пучка. Частицы с удаленным сегментом на освещенной поверхности могут генерировать ФК благодаря своей структурной асимметрии. Частицы, частично покрытые материалом с низким показателем преломления и высоким поглощением (Al) или материалом с высоким показателем преломления и низким поглощением (Si), демонстрируют примерно одинаковые параметры ФК. Основные характеристики ФК, такие как угол изгиба и длина, могут модулироваться изменением освещения или параметров генерирующей структуры.

В то же время только схема генерации ФК на основе частицы и экрана, расположенного вблизи ее освещенной стороны, не требует модификации самой частицы, например нанесения участка, покрытого металлической или диэлектрической пленкой, или усечения части поверхности частицы. На наш взгляд, это несомненное практическое преимущество такой схемы генерации ФК.

Энергетическое преимущество частицы с удаленной частью освещенной поверхности заключается в отсутствии экранирования падающего излучения. Мы считаем, что этот механизм формирования ФК может сыграть ключевую роль в разработке более совершенных и надежных систем сверхразрешающей визуализации с повышенным контрастом [16] на основе мезомасштабных частиц. В целом результаты будут способствовать дальнейшему развитию методов микроскопии на основе мезомасштабных частиц и облегчат их применение в мезотронике, биологических науках, нанотехнологиях и т. д.

Финансирование работы

Работа частично поддержана программой развития Томского политехнического университета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] И.В. Минин, О.В. Минин, *Устройство для формирования оптической ловушки в форме фотонного крюка*, патент РФ 161207 (заявл. 27.10.2015, опубл. 10.04.2016), бюл. № 10. https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000161207_20160410_U1_RU/?ysclid=mjmbtuv7vq891616389

[2] K. Dholakis, G.D. Bruce, Nat. Photon., **13**, 229 (2019). DOI: 10.1038/s41566-019-0403-9

[3] B. Luk'yanchuk, R. Paniagua-Domínguez, I.V. Minin, O.V. Minin, Z. Wang, Opt. Mater. Express, **7**, 1820 (2017). DOI: 10.1364/OME.7.001820

[4] I.V. Minin, O.V. Minin, *Photonic hook: from optics to acoustics and plasmonics* (Springer, Berlin, 2021).

[5] M. Lattuada, T.A. Hatton, Nano Today, **6** (3), 286 (2011). DOI: 10.1016/j.nantod.2011.04.008

[6] И.В. Минин, О.В. Минин, *Устройство формирования пучка Эйри в терагерцовом диапазоне длин волн*, патент РФ 196430 (заявл. 29.11.2019, опубл. 28.02.2020), бюл. № 7. https://patentimages.storage.googleapis.com/9e/29/16/3a2868e27ee381/RU196430U1.pdf

[7] I.V. Minin, O.V. Minin, C.Y. Liu, H.D. Wei, Y. Geints, A. Korachesky, Opt. Lett., **45**, 4899 (2020). DOI: 10.1364/OL.402248
[8] C. Xu, T. Yang, P. Zou, R. Ye, Proc. SPIE, **12316**, 1231602 (2022). DOI: 10.1117/12.2642931
[9] A.B. Pawar, I. Kretzschmar, Langmuir, **25**, 9057 (2009). DOI: 10.1021/la900809b
[10] Z. Rozynek, A. Mikkelsen, P. Dommersnes, J.O. Fossum, Nat. Commun., **5**, 3945 (2014). DOI: 10.1038/ncomms4945
[11] G. van Anders, N.K. Ahmed, R. Smith, M. Engel, S. Glotzer, ACS Nano, **8** (1), 931 (2014). DOI: 10.1021/nn4057353
[12] L. Rovigatti, J. Russo, F. Romano, Eur. Phys. J. E, **41**, 59 (2018). DOI: 10.1140/epje/i2018-11667-x
[13] J.L. Lawson, N.J. Jenness, R.L. Clark, Opt. Express, **23**, 33956 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.033956
[14] Refractive index Info. https://refractiveindex.info /?shelf =main&book=Al&page=Rakic
[15] N. Janoszka, S. Azhdari, C. Hils, D. Coban, H. Schmalz, A. Gröschel, Polymers, **13**, 4358 (2021). DOI: 10.3390/polym13244358
[16] B. Kachar, Science, **227**, 766 (1985). DOI: 10.1126/science.3969565