

Оптическая сила, действующая на частицу, в присутствии обратного потока вблизи фокуса градиентной линзы

А.Г. Налимов^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

Если вблизи поверхности (на расстоянии меньше 100 нм) высокоапертурной градиентной микролинзы из кремния с показателем преломления в виде гиперболического секанса, которая (линза) освещается лазерным излучением с длиной волны 1,55 мкм, на оптической оси расположить диэлектрическую наночастицу (диаметр около 70 нм), то ее будет притягивать к поверхности линзы с силой в доли пиконьютона. А если в линзе сделано углубление, то наночастица будет втягиваться в это углубление. Своего рода «оптический магнит». Если вблизи выходной поверхности такой градиентной линзы сформировать на оптической оси обратный поток энергии, то его присутствие приведет к тому, что диэлектрическая наночастица с поглощением будет «притягиваться» к поверхности с большей силой, чем такая же частица без поглощения. В отсутствие обратного потока обе частицы (с поглощением и без) притягиваются одинаково. Расчеты полей выполнены методом конечных разностей во временной области, а силы рассчитаны с помощью тензора напряжений Максвелла.

Ключевые слова: сила, обратная сила, момент силы, оптический пинцет, тензор напряжений Максвелла, градиентная линза.

Цитирование: Налимов, А.Г. Оптическая сила, действующая на частицу, в присутствии обратного потока вблизи фокуса градиентной линзы / А.Г. Налимов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 6. – С. 871-875. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-744.

Citation: Nalimov AG. Optical force acting on a particle in the presence of a backward energy flow near the focus of a gradient lens. Computer Optics 2020; 44(6): 871-875. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-744.

Введение

Изучение силы, действующей со стороны света на нанообъекты, до сих пор является актуальной темой исследований [1–11]. В последние годы особенный интерес вызывают исследования, где рассматривается действие силы на объекты размером порядка сотен нанометров. Это связано с тем, что диэлектрические и металлические частицы с таким характерным размером являются наиболее перспективными как детали для создания метаповерхностей [12–16]. Расчет силы действия света на такие частицы производится, как правило, в дипольном приближении [17, 18], что ограничивает применимость таких результатов. Например, в [19] численно и экспериментально была изучена подвижность похожих на стержни частиц, которая появлялась из-за действующего со стороны света момента силы. Расчеты проводились в дипольном приближении. А в [20] авторы аналитически изучали момент силы, действующий на пару наночастиц. Момент силы так же был рассчитан в дипольном приближении. Авторы в [21] рассмотрели силу, действующую со стороны некоторых Бесселевых пучков на наночастицу, которая рассчитывалась с помощью тензора напряженностей Максвелла, и обнаружили, что данная сила может быть отрицательной (обрат-

ной) и может быть направлена к источнику света, несмотря на отсутствие градиентной составляющей силы при постоянной интенсивности вдоль оптической оси. Сами же поля рассчитывались с помощью обобщенной теории Лоренца-Ми. При этом авторы утверждают, что наличие обратного потока интенсивности [22–24] (отрицательной проекции вектора Пойнтинга на ось распространения света) не является ни необходимым, ни достаточным условием для возникновения обратной силы. Свои расчеты они приводили для полистироловых частиц диаметром от 0 до 4 мкм при длине волны света $\lambda = 1,064$ мкм. А в [25] авторы на основании эффекта «оптического трактора» экспериментально доказали возможность захвата, группировки и сортировки наночастиц размером 600–800 нм при длине волны света 532 нм. Расчет действия силы производился в дипольном приближении.

Из приведенного краткого обзора можно сделать вывод, что строгий метод расчета силы на основании тензора напряжений Максвелла используется редко из-за большого объема вычислений. Кроме того, обратную силу искали для сравнительно больших (сотни нанометров – единицы микрометров) шариков, в то время как для шариков диаметром в десятки и сотни нанометров эффект обратной силы подробно не рассматривался.

В этой работе рассмотрена обратная сила, действующая на наночастицы с диаметром от 70 до 350 нм. Показано, что на наночастицы, состоящие как из оптически прозрачного материала ($n = 1,5$ – стекло), так и из поглощающих материалов ($n = 1,5 + 0,3i$, а также золото) при расположении в остром фокусе высокоапертурной градиентной микролинзы действует обратная сила (то есть продольная проекция вектора силы отрицательная). При этом рассмотрены случаи наличия и отсутствия обратного потока интенсивности и показано, что, хотя обратная сила возникает независимо от его наличия, обратный поток оказывает влияние на величину силы – увеличивает её по модулю. Кроме того, показано, что вырез в выходной плоскости градиентной линзы существенно увеличивает действующую на наночастицу силу, позволяя его затягивать внутрь выреза, где интенсивность света и его действие на наночастицу максимальны. Такую градиентную линзу можно использовать в качестве «оптического магнита» для наночастиц. Расчеты светового поля производились с помощью FDTD-метода в пакете FullWAVE с высокой подробностью, в области расположения наночастиц использовался шаг сетки отсчетов $\lambda/400$, а расчет силы со стороны света про-

изводился строгим методом на основании тензора напряженности Максвелла.

Постановка задачи

Расчеты производились в фокусе градиентной линзы Микаэляна, рассчитанной для фокусировки излучения на своем торце [26]. Показатель преломления такой линзы изменяется в соответствии с формулой:

$$n(r) = n_0 \left[ch \left(\frac{\pi r}{2L} \right) \right]^{-1}, \tag{1}$$

где $n_0 = 3,47$ – показатель преломления линзы на оси, r – радиальная координата, L – длина линзы. Диаметр линзы был равен $D = 11,7$ мкм, длина линзы $L = 5,877$ мкм, длина волны падающего света $\lambda = 1,55$ мкм. Показатель преломления на оси линзы $n(0) = 3,47$ (кремний), на краю линзы $n(D/2) = 1,0$. На одну из поверхностей такой линзы нормально падал плоский пучок света, имеющий левую круговую поляризацию и фазовый вихрь порядка $m = 2$ (рис. 1). Известно [26], что в таком случае образуется обратный поток энергии и интенсивность, близкая к максимальной на оптической оси.

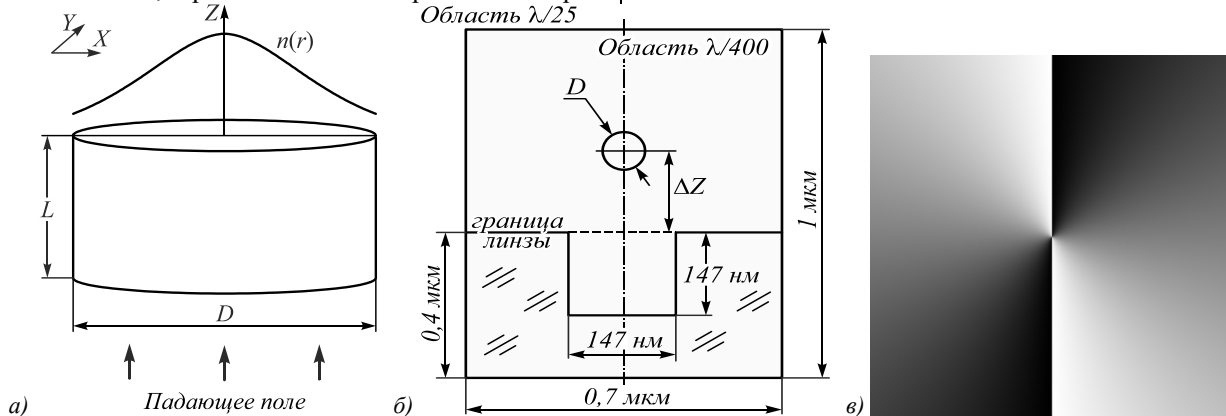


Рис. 1. Рассматриваемая градиентная линза (а) и схема (её сечение в плоскости XZ) расположения шара в щели (б), фаза падающего поля, имеющего левую круговую поляризацию и вихрь $m = 2$ (в)

Падающее поле было ограничено апертурой, равной диаметру линзы. На выходной поверхности линзы было сделано цилиндрическое отверстие диаметром 147 нм и глубиной внутрь линзы 147 нм. В [26] было показано, что такого размера отверстие максимизирует (по модулю) обратный поток энергии $S_z = (1/2) \text{Re} [\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}]_z$ на выходной поверхности линзы (50 нм за ней). На оптической оси располагался наночастица диаметром $D = 70$ нм.

Моделирование методом FDTD проводилось для трёх случаев: когда показатель преломления шара был равен $n = 1,5$ (стекло), $n = 1,5 + 0,3i$ (стекло с поглощением), $n = 0,52 + 10,7i$ (золото). Для расчета распространения света методом FDTD использовалась переменная сетка отсчетов. Разбиение по всей линзе и за её пределами составляло $\lambda/25$ по всем трем осям координат. Интересующая область вокруг щели в

границах $X, Y \in (-0,35 \text{ мкм}; 0,35 \text{ мкм})$, $Z \in (5,48 \text{ мкм}; 6,48 \text{ мкм})$ моделировалась с повышенной точностью (рис. 1б), шаг сетки в этой области по всем трем осям составлял $\lambda/400$. При увеличении разбиения в интересующей области до $\lambda/600$ полученные значения силы изменялись менее чем на 7,2% в точке на графике с максимальным различием, однако время моделирования возрастало примерно в полтора раза, поэтому выбор был сделан в пользу разбиения $\lambda/400$. Расчет сил производился по полю вокруг шара по формуле:

$$\mathbf{F} = -\oint_S (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) dS, \tag{2}$$

где \mathbf{n} – внешний вектор нормали к поверхности S , $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений электромагнитного поля Максвелла, компоненты которого в системе СГС имеют вид :

$$\sigma_{ik} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{|\mathbf{E}|^2 + |\mathbf{H}|^2}{2} \delta_{ik} - E_i E_k - H_i H_k \right), \quad (3)$$

где E_i, H_i – компоненты электрического и магнитного полей, δ_{ik} – символ Кронекера ($\delta_{i=k} = 1, \delta_{i \neq k} = 0$).

Падающее поле – левая круговая поляризация и фазовый вихрь $m=2$

На рис. 2 представлены результаты моделирования силы и момента силы, действующей на наночастицу при описанных выше условиях.

Из рис. 2а видно, что, если золотая частица расположена в начале выреза, на нее действует положительная сила вдоль оптической оси. Но по мере сме-

щения в положительном направлении вдоль оси Z она доходит до точки устойчивого равновесия примерно на расстоянии от границы линзы $\Delta Z = -45$ нм. В случае частицы с показателем преломления $n=1,5$ без поглощения и с поглощением $n=1,5+0,3i$ проекция силы F_z на том же интервале остается отрицательной, однако по модулю они меньше приблизительно в 3,5 раза, чем для наночастицы из золота. На рис. 2б приведен момент силы, вращающий наночастицу из тех же материалов вокруг оптической оси Z и рассчитанный относительно центра шара. Расчет момента силы производился по формуле [27]:

$$\mathbf{M} = \oint_S [\mathbf{r} \times (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n})] dS, \quad (4)$$

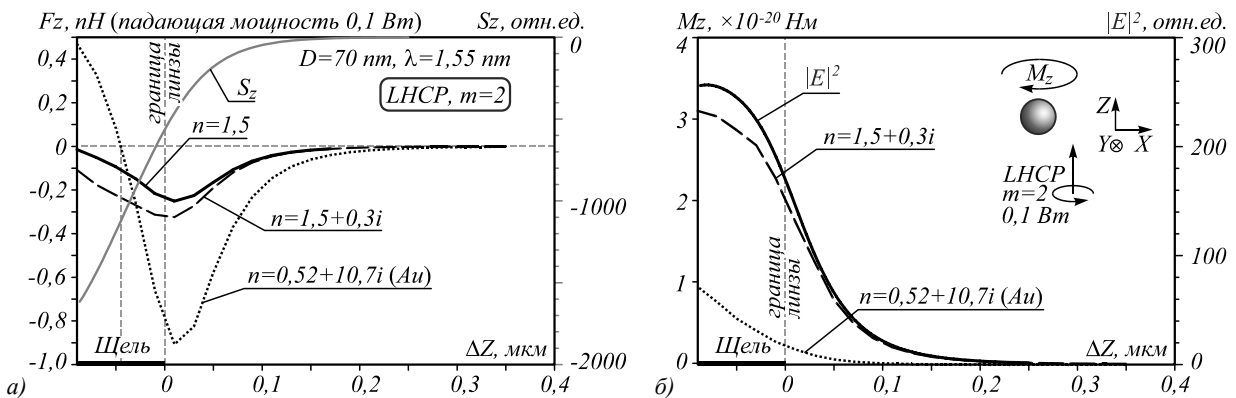


Рис. 2. Зависимость проекции силы F_z (а) и момента $M_z = [\mathbf{r} \times \mathbf{F}]_z$ (б), действующих на шар, от координаты шара ΔZ относительно границы линзы, и интенсивности света $|E|^2$ на оптической оси. Падающая волна – левая круговая поляризация с фазовым вихрем $m=2$

где \mathbf{r} – радиус-вектор от точки, относительно которой рассчитывается момент силы, до точки интегрирования на поверхности S . Можно заметить, что момент, действующий на шар из золота, примерно в 3 раза меньше момента, действующего на поглощающую частицу, что связано с большим отражением от золота и меньшей передачей момента наночастице со стороны света. Момент силы, действующий на непоглощающую частицу с $n=1,5$, равен нулю. Разность в направлении вращения вектора падающего на линзу электрического поля и момента M_z обусловлена тем, что после фокусировки света направление вращения электрического вектора меняется на противоположное. В фокусе линзы и направление вращения вектора электрического поля, и направление действия момента M_z совпадают по направлению. Из рис. 2а видно, что в присутствии обратного потока энергии отрицательная сила, действующая на диэлектрическую поглощающую частицу, больше, чем действующая на непоглощающую.

Круговая поляризация без фазового вихря

На рис. 3 показаны зависимости проекции силы F_z от расположения шара для рассматриваемых показателей преломления, но падающее на линзу поле имеет левую круговую поляризацию при плоском волновом

фронте с постоянной фазой. При таком начальном поле в фокусе линзы обратный поток интенсивности не образуется.

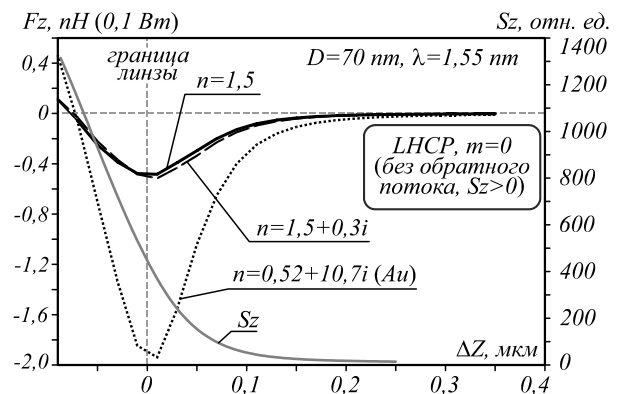


Рис. 3. Зависимость проекции силы F_z (а), действующей на шар, от координаты шара ΔZ относительно границы линзы. Падающая волна с левой круговой поляризацией

Видно, что при отсутствии фазового вихря проекция силы F_z , действующая на шар из золота на границе линзы, по модулю выросла в 2,1 раза, в то время как на поглощающий шар она выросла всего на 52%, а на непоглощающий – на 97%. При этом для шара из золота в начале графика (координата шара $\Delta Z = -90$ нм) проекция силы $F_z = 0,45$ нН для обоих падающих полей,

несмотря на разницу в интенсивности на оптической оси, приведенную на рис. 4.

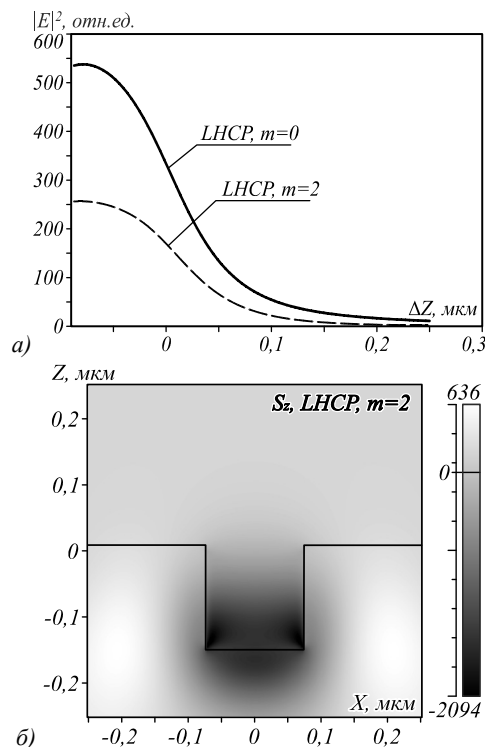


Рис. 4. Интенсивность $|E|^2$ на оптической оси для случая круговой поляризации с фазовым вихрем $t = 2$ и наличием обратного потока интенсивности и в отсутствие фазового вихря $t = 2$ (а) и проекция вектора Пойнтинга S_z на ось Z в случае падающего поля с левой круговой поляризацией и фазовым вихрем $t = 2$ в плоскости XZ (б)

Из рис. 2–4 видно, что для непоглощающей частицы, равно как и для частицы из золота, график силы не пропорционален интенсивности света, которая в фокусе на оптической оси для двух начальных падающих полей близка по форме, но различается в 1,99...2,09 раз в рассматриваемом диапазоне значений ΔZ . В случае в два раза меньшей интенсивности света на оптической оси было бы логично ожидать уменьшения силы, действующей на все три наночара, так же в два раза. Но мы наблюдаем, что в случае наличия обратного потока вектора Пойнтинга (рис. 4б) сила, действующая на поглощающий шар и шар из золота, по модулю больше ожидаемого и направлена назад, в сторону источника света, что доказывает влияние обратного потока.

Влияние на проекцию силы размера частицы

Интересной выглядит зависимость продольной проекции силы, действующей на шар, от его размера. На рис. 5 приведены зависимости проекции силы F_z от размера наночара, расположенного за линзой. Для того, чтобы корректно рассчитать силу, расстояние от границы линзы (без щели) до центра частицы было выбрано 0,25 мкм. Расчёты проводились с диаметром наночара D от 0,07 до 0,35 мкм.

Из рис. 5 видно, что при росте до диаметра $D=0,2$ мкм сила на наночастицы со всеми тремя показателями преломления растёт по модулю и остается отрицательной, но затем с дальнейшим ростом диаметра золотая частица начинает выталкиваться из пучка, в то время как поглощающая и диэлектрическая частицы продолжают испытывать отрицательную силу. Причем поглощающая частица притягивается назад к линзе немного сильнее, чем диэлектрическая без поглощения.

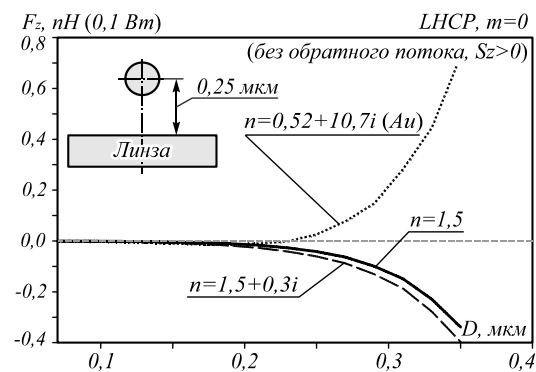


Рис. 5. Зависимость проекции силы F_z , действующей на шар, от диаметра шара D . Расстояние от центра шара до границы линзы было взято 0,25 мкм

Заключение

В работе рассчитана продольная проекция силы F_z , действующая на наночастицу в остром фокусе градиентной гиперболической секансной линзы с вырезом на оптической оси. Показано, что для малых частиц, близких по размеру к критерию Рэлея, имеет место обратная сила, которая тянет частицу назад, в сторону к источнику света. Показано, что в двух схожих распределениях интенсивности на оптической оси в фокусе линзы при наличии и отсутствии обратного потока проекция силы на оптическую ось F_z отрицательна и по отношению к интенсивности больше в том случае, когда обратный поток присутствует. Этот эффект больше выражен для поглощающих частиц и для частиц из золота. Показано также, что для частицы из золота характерна обратная сила при малом размере частицы (шар диаметром 70 нм при длине волны света $\lambda=1,55$ мкм). Эта сила достигает величины $F_z=-1,9$ пН при расположении наночара на границе линзы при падающем поле – левой круговой поляризации без фазового вихря, и превышает в 3,9 раз по модулю проекции силы F_z в случае непоглощающего ($n=1,5$) или поглощающего ($n=1,5+0,3i$) наночара. При этом мощность падающего пучка во всех случаях одинакова и равна 100 мВт. Обратная сила для наночара из золота пропадает при увеличении его диаметра, что согласуется с выводами в работе [21].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в частях «Падающее поле – левая

круговая поляризация и фазовый вихрь $m=2$) и «Круговая поляризация без фазового вихря» (грант 18-19-00595), Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20003, 18-07-01380) в частях «Постановка задачи», «Влияние на проекцию силы размера частицы» а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в частях «Введение» и «Заключение».

Литература

1. **Li, H.** Optical pulling forces and their applications / H. Li, Y. Cao, L. Zhou, X. Xu, T. Zhu, Y. Shi, C. Qiu, W. Ding // *Advances in Optics and Photonics*. – 2020. – Vol. 12. – P. 288-366.
2. **Sraj, I.** Dynamic ray tracing for modeling optical cell manipulation / I. Sraj, A.C. Szatmary, D.W.M. Marr, C.D. Eggleton // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18. – P. 16702-16714.
3. **Zhong, M.** Measurement of interaction force between RGD-peptide and Hela cell surface by optical tweezers / M. Zhong, G. Xue, J. Zhou, Z. Wang, Y. Li // *Chinese Optics Letters*. – 2012. – Vol. 10. – P. 101701-101701.
4. **Zhou, J.H.** Calculation of optical forces on an ellipsoid using vectorial ray tracing method / J.H. Zhou, M.C. Zhong, Z.Q. Wang, Y.M. Li // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20. – P. 14928-14937.
5. **Liu, S.** Miniaturized optical fiber tweezers for cell separation by optical force / S. Liu, Z. Li, Z. Weng, Y. Li, L. Shui, Z. Jiao, Y. Chen, A. Luo, X. Xing, S. He // *Optics Letters*. – 2019. – Vol. 44. – P. 1868-1871.
6. **Drobczyński, S.** Real-time force measurement in double wavelength optical tweezers / S. Drobczyński, K. Duśzachniewicz // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2017. – Vol. 34. – P. 38-43.
7. **Yu, Y.** Methods of calibration to optical trapping force upon non-spherical cells / Y. Yu, Z. Zhang, Z. Li, X. Wang // *Chinese Optics Letters*. – 2006. – Vol. 4. – P. 722-724.
8. **Muradoglu, M.** Optical force lateral push-pulling using focus positioning / M. Muradoglu, W.S.Y. Chiu, T.W. Ng // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2012. – Vol. 29. – P. 874-880.
9. **Wang, D.** Optical pulling force in periodic backward-wave waveguides / D. Wang, Z. Wang // *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (online)*. – 2017. – FTh1H.4.
10. **Jing, P.** Optical tweezers system for live stem cell organization at the single-cell level / P. Jing, Y. Liu, E.G. Keeler, N.M. Cruz, B.S. Freedman, L.Y. Lin // *Biomedical Optics Express*. – 2018. – Vol. 9. – P. 771-779.
11. **Liu, H.** Optical pulling and pushing forces exerted on silicon nanospheres with strong coherent interaction between electric and magnetic resonances / H. Liu, M. Panmai, Y. Peng, S. Lan // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 11. – P. 12357-12371.
12. **Kuznetsov, A.I.** Magnetic light / A.I. Kuznetsov, A.E. Miroshnichenko, Y.H. Fu, J. Zhang, B. Luk'yanchuk // *Scientific Reports*. – 2012. – Vol. 2. – 492.
13. **Evlyukhin, A.B.** Demonstration of magnetic dipole resonances of dielectric nanospheres in the visible region / A.B. Evlyukhin, S.M. Novikov, U. Zywietz, R.L. Eriksen, C. Reinhardt, S.I. Bozhevolnyi, B.N. Chichkov // *Nano Letters*. – 2012. – Vol. 12, Issue 7. – P. 3749-3755.
14. **Shi, L.** A new dielectric metamaterial building block with a strong magnetic response in the sub-1.5-micrometer region: silicon colloid nanocavities / L. Shi, T.U. Tuzer, R. Fenollosa, F. Meseguer // *Advanced Materials*. – 2012. – Vol. 24, Issue 44. – P. 5934-5938.
15. **Geffrin, J.M.** Magnetic and electric coherence in forward- and back-scattered electromagnetic waves by a single dielectric subwavelength sphere / J.M. Geffrin, B. García-Cámara, R. Gómez-Medina, P. Albella, L.S. Froufe-Pérez, C. Eyraud, A. Litman, R. Vaillon, F. González, M. Nieto-Vesperinas, J.J. Sáenz, F. Moreno // *Nature Communications*. – 2012. – Vol. 3. – 1171.
16. **Fu, Y.H.** Directional visible light scattering by silicon nanoparticles / Y.H. Fu, A.I. Kuznetsov, A.E. Miroshnichenko, Y.F. Yu, B. Luk'yanchuk // *Nature Communications*. – 2013. – Vol. 4. – 1527.
17. **Harada, Y.** Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime / Y. Harada, T. Asakura // *Optics Communications*. – 1996. – Vol. 124. – P. 529-541.
18. **Bekshaev, A.Ya.** Subwavelength particles in an inhomogeneous light field: optical forces associated with the spin and orbital energy flows / A.Ya. Bekshaev // *Journal of Optics*. 2013. – Vol. 15. – 044004.
19. **Biener, G.** Optical torques guiding cell motility / G. Biener, E. Vrotsos, K. Sugaya, A. Dogariu // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17. – P. 9724-9732.
20. **Nieto-Vesperinas, M.** Optical torque on small bi-isotropic particles / M. Nieto-Vesperinas // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40. – P. 3021-3024.
21. **Chen, J.** Optical pulling force / J. Chen, J. Ng, Z.F. Lin, C.T. Chan // *Nature Photonics*. – 2011. – Vol. 5, Issue 9. – P. 531-534.
22. **Novitsky, A.V.** Negative propagation of vector Bessel beams / A.V. Novitsky, D.V. Novitsky // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2007. – Vol. 24. – P. 2844-2849.
23. **Стафеев, С.С.** Поведение продольной компоненты вектора Пойнтинга при острой фокусировке оптических вихрей с линейной и круговой поляризацией / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*, 2018. – Т. 42, № 2. – С. 190-196. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-190-196.
24. **Kotlyar, V.V.** Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.G. Nalimov // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43, Issue 2. – P. 2921-2924. – DOI: 10.1364/OL.43.002921.
25. **Brzobohatý, O.** Experimental demonstration of optical transport, sorting and self-arrangement using a 'tractor beam' / O. Brzobohatý, V. Karásek, M. Šiler, L. Chvátal, T. Čížmár, P. Zemánek // *Nature Photonics*. – 2013. – Vol. 7, Issue 2. – P. 123-127.
26. **Налимов, А.Г.** Поток энергии вихревого поля в фокусе секансной градиентной линзы / А.Г. Налимов, С.С. Стафеев // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 707-711. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-688.
27. **Налимов, А.Г.** Расчёт момента силы, действующей со стороны цилиндрического гауссова пучка на цилиндрическую микрочастицу / А.Г. Налимов, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2007. – Т. 31, № 2. – С. 16-20.

Сведения об авторе

Сведения об авторе **Налимов Антон Геннадьевич** – см. стр. 870 этого номера.

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 23 июня 2020 г. Окончательный вариант – 25 сентября 2020 г.

Optical force acting on a particle in the presence of a backward energy flow near the focus of a gradient lens

A.G. Nalimov^{1,2}

¹IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

²Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

Abstract

We show that a 70-nm dielectric nanoparticle placed on the optical axis near the surface (at a distance less than 100 nm) of a high-NA gradient microlens made of silicon, which is illuminated by a laser beam of 1.55 μm wavelength, is attracted to the lens surface with a piconewton force. The profile of the lens refractive index is described by a hyperbolic secant function. If a cut-out is made in the lens output surface, then the nanoparticle will be pulled into this cut-out, producing a kind of 'optical magnet'. If a reverse energy flow is to be generated on the optical axis near the output surface of such a gradient lens, this will lead to an absorbing dielectric nanoparticle being pulled toward the surface with a greater force than a similar non-absorbing particle. In the absence of a reverse flow, both absorbing and non-absorbing particles will be attracted to the surface with an equal force. The electromagnetic fields involved are calculated using a finite difference time domain (FDTD) method and the acting forces are calculated using a Maxwell stress tensor.

Keywords: force, backward force, moment of force, optical tweezers, Maxwell stress tensor, rotation, gradient lens.

Citation: Nalimov AG. Optical force acting on a particle in the presence of a backward energy flow near the focus of a gradient lens. *Computer Optics* 2020; 44(6): 871-875. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-744.

Acknowledgements: The work was partly funded the Russian Science Foundation under grant #18-19-00595 (in parts "Incident field – left hand circular polarization and phase vortex $m = 2$ ", "Circular polarization without a phase vortex"), the Russian Foundation for Basic Research grant ##18-29-20003, 18-07-01380 (in parts "Problem formulation", "Dependence the force of a particle size") and by the RF Ministry of Science and Higher Education within a state contract with the "Crystallography and Photonics" Research Center of the RAS (in part "Introduction", "Conclusion").

References

- [1] Li H, Cao Y, Zhou L, Xu X, Zhu T, Shi Y, Qiu C, Ding W. Optical pulling forces and their applications. *Adv Opt Photon* 2020; 12: 288-366.
 - [2] Sraj I, Szatmary AC, Marr DWM, Eggleton CD. Dynamic ray tracing for modeling optical cell manipulation. *Opt Express* 2010; 18: 16702-16714.
 - [3] Zhong M, Xue G, Zhou J, Wang Z, Li Y. Measurement of interaction force between RGD-peptide and HeLa cell surface by optical tweezers. *Chin Opt Lett* 2012; 10: 101701-101701.
 - [4] Zhou JH, Zhong MC, Wang ZQ, Li YM. Calculation of optical forces on an ellipsoid using vectorial ray tracing method. *Opt Express* 2012; 20: 14928-14937.
 - [5] Liu S, Li Z, Weng Z, Li Y, Shui L, Jiao Z, Chen Y, Luo A, Xing X, He S. Miniaturized optical fiber tweezers for cell separation by optical force. *Opt Lett* 2019; 44: 1868-1871.
 - [6] Drobczyński S, Duś-szachniewicz K. Real-time force measurement in double wavelength optical tweezers. *J Opt Soc Am B* 2017; 34: 38-43.
 - [7] Yu Y, Zhang Z, Li Z, Wang X. Methods of calibration to optical trapping force upon non-spherical cells. *Chin Opt Lett* 2006; 4: 722-724.
 - [8] Muradoglu M, Chiu WSY, Ng TW. Optical force lateral push-pulling using focus positioning. *J Opt Soc Am B* 2012; 29: 874-880.
 - [9] Wang D, Wang Z. Optical pulling force in periodic backward-wave waveguides. *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (online)* 2017: FTh1H.4.
 - [10] Jing P, Liu Y, Keeler EG, Cruz NM, Freedman BS, Lin LY. Optical tweezers system for live stem cell organization at the single-cell level. *Biomed Opt Express* 2018; 9: 771-779.
 - [11] Liu H, Panmai M, Peng Y, Lan S. Optical pulling and pushing forces exerted on silicon nanospheres with strong coherent interaction between electric and magnetic resonances. *Opt Express* 2017; 25(11): 12357-12371.
 - [12] Kuznetsov AI, Miroshnichenko AE, Fu YH, Zhang J, Luk'yanchuk B. Magnetic light. *Sci Rep* 2012; 2: 492.
 - [13] Evlyukhin AB, Novikov SM, Zywiets U, Eriksen RL, Reinhardt C, Bozhevolnyi SI, Chichkov BN. Demonstration of magnetic dipole resonances of dielectric nanospheres in the visible region. *Nano Lett* 2012; 12(7): 3749-3755.
 - [14] Shi L, Tuzer TU, Fenollosa R, Meseguer F. A new dielectric metamaterial building block with a strong magnetic response in the sub-1.5-micrometer region: silicon colloid nanocavities. *Adv Mater* 2012; 24(44): 5934-5938.
 - [15] Geffrin JM, García-Cámara B, Gómez-Medina R, Albellá P, Froufe-Pérez LS, Eyraud C, Litman A, Vaillon R, González F, Nieto-Vesperinas M, Sáenz JJ, Moreno F. Magnetic and electric coherence in forward- and back-scattered electromagnetic waves by a single dielectric subwavelength sphere. *Nat Commun* 2012; 3: 1171.
-

-
- [16] Fu YH, Kuznetsov AI, Miroshnichenko AE, Yu YF, Luk'yanchuk B. Directional visible light scattering by silicon nanoparticles. *Nat Commun* 2013; 4: 1527.
- [17] Harada Y, Asakura T. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime. *Opt Commun* 1996; 124: 529-541.
- [18] Bekshaev AYa. Subwavelength particles in an inhomogeneous light field: optical forces associated with the spin and orbital energy flows. *J Opt* 2013; 15: 044004.
- [19] Biener G, Vrotsos E, Sugaya K, Dogariu A. Optical torques guiding cell motility. *Opt Express* 2009; 17: 9724-9732.
- [20] Nieto-Vesperinas M. Optical torque on small bi-isotropic particles. *Opt Lett* 2015; 40: 3021-3024.
- [21] Chen J, Ng J, Lin ZF, Chan CT. Optical pulling force. *Nat Photonics* 2011; 5(9): 531-534.
- [22] Novitsky AV, Novitsky DV. Negative propagation of vector Bessel beams. *J Opt Soc Am A* 2007; 24: 2844-2849.
- [23] Stafeev SS, Nalimov AG. Longitudinal component of the Poynting vector of a tightly focused optical vortex with circular polarization. *Computer Optics* 2018; 42(2): 190-196. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-190-196.
- [24] Kotlyar VV, Kovalev AA, Nalimov AG. Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy. *Opt Lett* 2018; 43(2): 2921-2924. DOI: 10.1364/OL.43.002921.
- [25] Brzobohatý O, Karásek V, Šiler M, Chvátal L, Čížmár T, Zemánek P. Experimental demonstration of optical transport, sorting and self-arrangement using a 'tractor beam'. *Nat Photonics* 2013; 7(2): 123-127.
- [26] Nalimov AG, Stafeev SS. Energy flux of a vortex field focused using a secant gradient lens. *Computer Optics* 2020; 44(5): 707-711. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-688.
- [27] Nalimov AG, Kotlyar VV. Calculation of the moment of force acting by a cylindrical Gaussian beam on a cylindrical microparticle. *Computer Optics* 2007; 31(2): 16-20.
-

Author's information

Anton Gennadyevich Nalimov (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 "Mathematical modeling and program complexes", finished it in 2006 with speciality 01.04.05 "Optics". A.G. Nalimov works on Technical Cybernetics department in Samara National Research University as an associate professor, works as a scientist in Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Samara, Russia. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 130 papers and 3 inventions. E-mail: anton@smr.ru.

Received June 23, 2020. The final version – September 25, 2020.
