

Формирование поляризационного вихря с обратным потоком энергии

А.Г. Налимов^{1,2}, В.В. Котляр^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В работе численно показано, что сфокусированное поле, имеющее поляризационную сингулярность, может сформировать на оптической оси область, в которой направление течения энергии отрицательное вдоль оптической оси, то есть энергия течет назад в сторону источника. Отрицательные значения проекции вектора Пойнтинга на оптическую ось в этой области по модулю сравнимы с другими областями, где энергия течет в положительном направлении оптической оси. Данное поле можно сформировать и сфокусировать металинзой, при этом для преобразования поля и его фокусировки на нее нужно подать плоскую волну.

1. Введение

Начиная с работы [1] стало известно об обратном потоке энергии при распространении светового поля в свободном пространстве. В местах обратного потока продольная компонента вектора Пойнтинга принимает отрицательные значения. Этому явлению в оптике посвящено относительно не много работ [1-10]. В [1] показали, что при фокусировке плоской волны с линейной поляризацией с помощью апланатической системы в плоскости фокуса в области первого темного кольца интенсивности имеется область, в которой поток световой энергии направлен в обратную сторону по отношению к направлению распространения падающей плоской волны. В [2, 3] было проведено теоретическое исследование обратного потока вектора Пойнтинга. В [4] обратный поток получен в суперпозиции двух пучков. В [5] обратный поток энергии получен в фокусе металинзы, в [6] обратный поток найден в векторных пучках Бесселя с дробным топологическим зарядом. В [7] численно исследовались векторные пучки, в [8] обратный поток рассмотрен для ускоряющихся 2D пучков Эйри. В [9] проведен теоретический анализ условий возникновения обратного потока. Авторы в [10] получили обратный поток для круговой поляризации, сформированной спиральной зонной пластинкой. В данной работе численно рассматривается металинза, с помощью которой можно получить обратный поток для падающей линейно-поляризованной волны. Это упрощает проведение эксперимента, поскольку нет необходимости использовать несколько оптических элементов и точно их позиционировать для формирования нужного волнового фронта и фокусировки полученного излучения, и даже вообще как-либо преобразовывать падающую плоскую линейно-поляризованную волну.

2. Моделирование фокусировки векторного вихря

В данной работе предложено формирование поляризационного вихря второго порядка. В таком вихре вектор электрического поля описывается формулой:

$$E = \begin{pmatrix} -\sin(m\phi) \\ \cos(m\phi) \end{pmatrix}, m=2. \quad (1)$$

Ниже представлены проекции электрического вектора E_x и E_y .

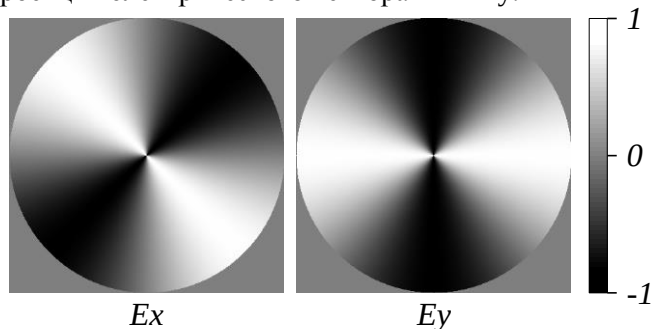


Рисунок 1. Проекция вектора электрического поля на оси X и Y - белый цвет соответствует максимальному значению проекции (+1), черный - минимальному (-1), нулевое значение - средний серый цвет.

Поляризация такого поля представлена на следующем рисунке, его интенсивность единичная по всему полю.

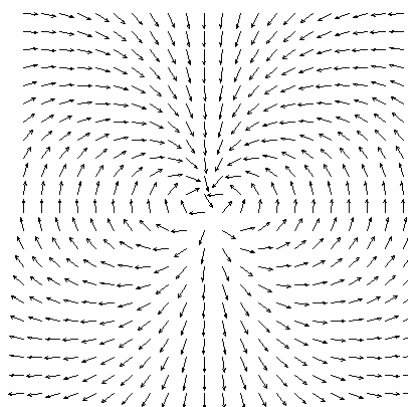


Рисунок 2. Распределение поляризации в поле, описанном формулой (1).

На рис. 3 представлен результат фокусировки такого пучка. На рис. 3а, б изображены двумерные распределения интенсивности и продольной компоненты вектора Пойнтинга, на рис. 3в, г - поперечные сечения вдоль осей X и Y обоих распределений соответственно. Моделирование проводилось методом FDTD для фокусировки вихря поляризации с помощью зонной пластинки, содержащей 6 колец, при параметрах: длина волны падающего излучения $\lambda=633$ нм, фокусного расстояния $f=\lambda$, сетка моделирования $\lambda/30$ по всем трем координатам. Поле было ограничено круглой апертурой диаметром 8 мкм.

Как видно из рис. 3, при фокусировки рассматриваемого поля на оптической оси в фокусном пятне возникает обратный поток энергии. Такое поле можно получить из линейно поляризованной плоской волны и сфокусировать с помощью металинзы. На рис. 4 показан внешний вид такой металинзы.

Металинза составлялась из 16 секторов. В каждом секторе решетки чередуются в соответствии с зонами зонной пластинки Френеля, рассчитанной на фокусное расстояние $f=\lambda$ – в каждой следующей зоне направление поляризации поворачивается на π относительно предыдущей. При показателе преломления материала метаповерхности $n=4.352+0.486i$ (аморфный кремний) высота рельефа составляет 120 нм. Период решеток составляет 220 нм.

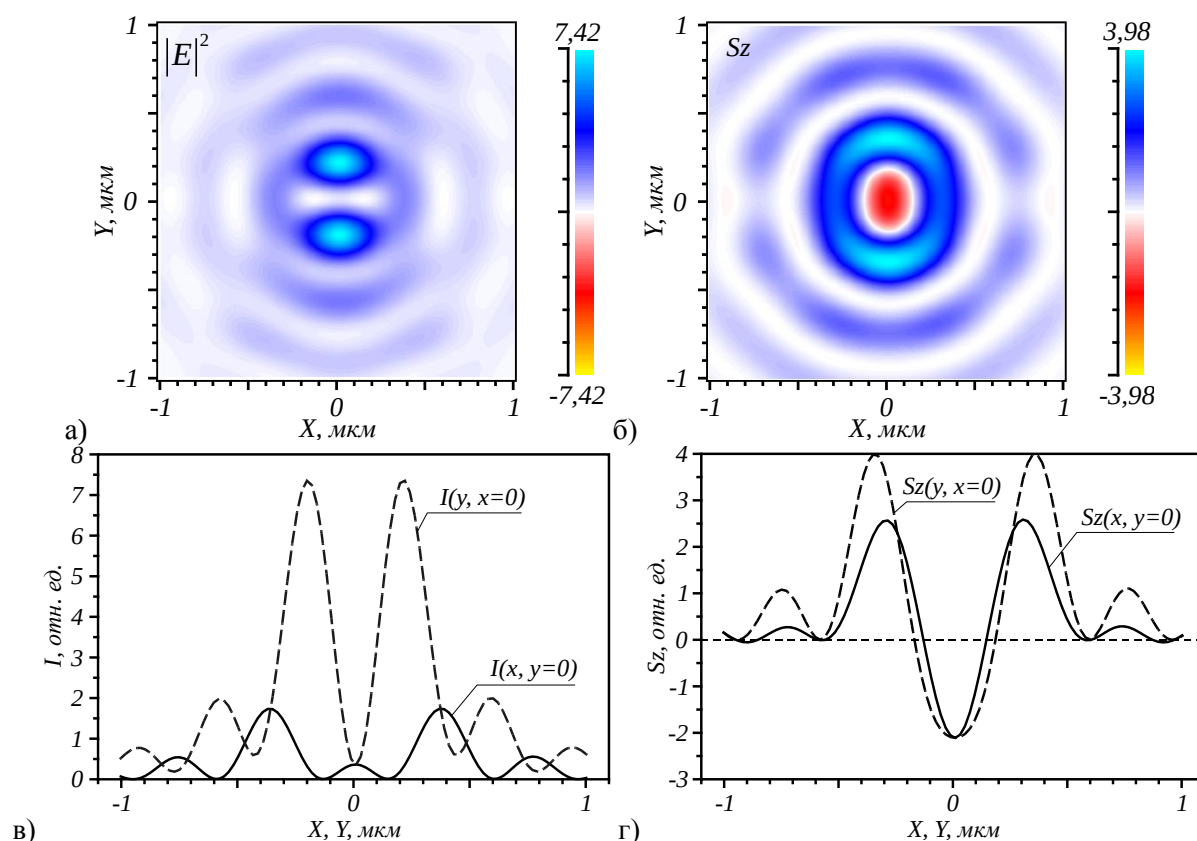


Рисунок 3. Интенсивность и продольная проекция вектора Пойнтинга в фокусной плоскости на расстоянии 0,6 мкм от падающего поля, имеющего в себе набег фазы зонной пластинки.

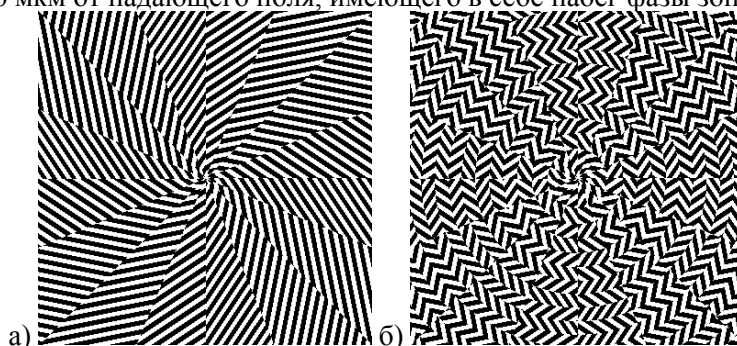


Рисунок 4. Метаповерхность для формирования вихря поляризации (а) и металинзы, фокусирующее это излучение (б).

На рис. 5 представлены результаты фокусировки излучения металинзой для падающей плоской волны, ограниченной апертурой 8 мкм, как и в предыдущем случае.

Видно, что в обоих случаях имеет место обратный поток энергии в центре фокусного пятна. В случае использования металинзы для фокусировки теряется симметрия вдоль оси X и Y в проекции вектора Пойнтинга, что объясняется разной эффективностью при преобразовании поляризации в зависимости от поворота угла вектора электрического поля. При этом в случае металинзы падающая волна является плоской, что делает получение обратного потока интенсивности на практике наиболее простым, так как для его достижения нет нужды преобразовывать лазерное излучение по поляризации, интенсивности или фазе.

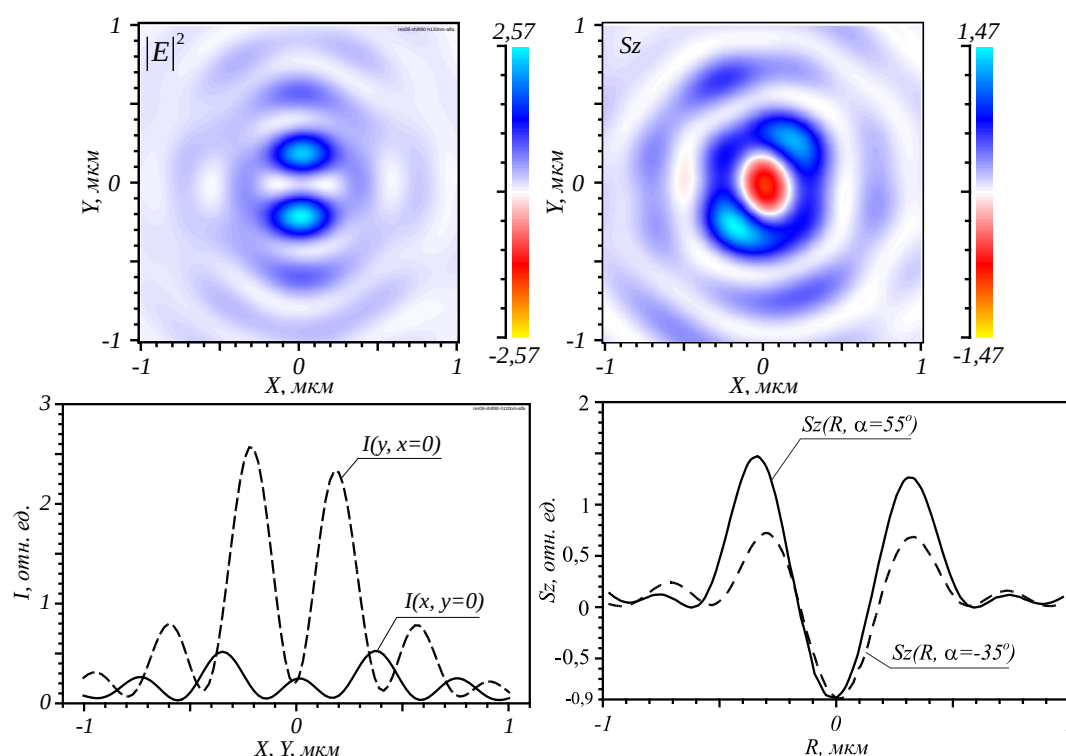


Рисунок 5. Интенсивность и продольная проекция вектора Пойнтинга в фокусной плоскости на расстоянии 0,6 мкм от падающего поля, прошедшего через металинзу. Проекция вектора Пойнтинга отображены с наклоном к оси X 55 и -35 проходя в центре через оптическую ось $X=Y=0$.

3. Литература

- [1] Richards, B. Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards, E. Wolf // Proc. R. Soc. A. – 1959. – Vol. 253 – P. 358-379.
- [2] Novitsky, A.V. Negative propagation of vector Bessel beams / A.V. Novitsky, D.V. Novitsky // J. Opt. Soc. Am. A. – 2007. – Vol. 24. – P. 2844-2849.
- [3] Monteiro, P.B. Angular momentum of focused beams: Beyond the paraxial approximation / P.B. Monteiro, P.A.M. Neto, H.M. Nussenzveig // Phys. Rev. A. – 2009. – Vol. 79. – P. 033830.
- [4] Sukhov, S. On the concept of "tractor beams" / S. Sukhov, A. Dogariu // Opt. Lett. – 2010. – Vol. 35. – P. 3847-3849.
- [5] Kotlyar, V.V. A vector optical vortex generated and focused using a metalens / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov // Computer Optics. – 2017. – Vol. 41(5). – P. 645-653. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-645-654.
- [6] Mitri, F.G. Reverse propagation and negative angular momentum density flux of an optical nondiffracting nonparaxial fractional Bessel vortex beam of progressive waves / F.G. Mitri // J. Opt. Soc. Am. A. – 2016. – Vol. 33. – P. 1661-1667.
- [7] Salem, M.A. Energy flow characteristics of vector X-wave / M.A. Salem, H. Bagci // Opt. Express. – 2011. – Vol. 19. – P. 8526-8532.
- [8] Vaveliuk, P. Negative propagation effect in nonparaxial Airy beams / P. Vaveliuk, O. Martinez-Matos // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20. – P. 26913-26921.
- [9] Berry, M.V. Quantum backflow, negative kinetic energy, and optical retro-propagation / M.V. Berry // J. Phys. A: Mathem. & Theor. – 2010. – Vol. 43. – P. 415302.
- [10] Стафеев, С.С. Поведение продольной компоненты вектора Пойнтинга при острой фокусировке оптических вихрей с 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.

Forming of polarization vortex with backward energy flow

A.G. Nalimov^{1,2}, V.V. Kotlyar^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. It is shown numerically that a focused field with a polarization singularity can form on the optical axis a region in which the direction of energy flow is negative along the optical axis, that is, energy flows back towards to the source. Negative values of the Poynting projection on the optical axis in this region are modulo comparable to other regions where energy flows in the positive direction of the optical axis. This field can be formed and focused by a metalens, incident plane wave have to be used.