

Влияние оптических «диполей» на топологический заряд пучка в дальней зоне

А.Г. Налимов

Самарский национальный исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
anton@ipsiras.ru

В.В. Котляр

Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника» РАН
Самара, Россия
kotlyar@ipsiras.ru

Аннотация—В работе с помощью интеграла Рэлея-Зоммерфельда и формулы Берри рассчитан топологический заряд (ТЗ) гауссова оптического вихря с начальным дробным ТЗ. Показано, что при разной дробной части ТЗ в пучке присутствуют разное число винтовых дислокаций, которые определяют ТЗ всего пучка. При малой дробной части ТЗ пучок состоит из основного оптического вихря с центром на оптической оси с ТЗ, равным ближайшему целому числу (пусть n), и двух краевых дислокаций, расположенных на вертикальной оси (выше и ниже центра). При увеличении дробной части начального ТЗ из верхней краевой дислокации формируется «диполь», состоящий из двух вихрей с ТЗ +1 и -1. При дальнейшем увеличении дробной части дополнительный вихрь с ТЗ +1 смещается к центру пучка, а вихрь с ТЗ -1 смещается на периферию.

Ключевые слова— оптический вихрь, оптические диполи, топологический заряд.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в научной литературе встречается множество работ касаясь создания и детектирования топологического заряда в лазерных пучках [1-9], распространение пучков с орбитальным угловым моментом, обзоры [10] и монографии по ним [11]. В основном это экспериментальные работы, в которых авторы создают и детектируют различные световые пучки, обладающие орбитальным угловым моментом и топологическим зарядом. Несмотря на то, что вихревые пучки известны более 40 лет, в них до сих пор остается множество нерешенных вопросов. Например, Берри в [12] установил, что оптический вихрь состоит из большого количества винтовых дислокаций, расположенных напротив друг друга относительно центра пучка, заряды которых равны +1 и -1 и взаимно уравнивают друг друга. Вместе все эти вихри составляют так называемый «отель» Гильберта [13], эти дислокации находятся на большом расстоянии от центра пучка. При увеличении топологического заряда падающего пучка, один из этих вихрей подходит к центру и меняет ТЗ пучка.

Данная работа посвящена рассмотрению формирования ТЗ пучка при дробном начальном ТЗ. Расчет распространения света проводился с помощью интеграла Рэлея-Зоммерфельда для непараксиального случая [14]. Расчет пучка в поперечной плоскости производился для апертуры с радиусом 138 мкм, что позволяло регистрировать отдельные сингулярности в пучке далеко от центра. Расчет проводился для длины волны света 633 нм. Были рассмотрены случаи постепенного изменения дробного начального ТЗ пучка от 2 до 3 и от 3 до 4. Расчет ТЗ при этом проводился по большим радиусам вплоть до 138 мкм. В работе показано, что при изменении ТЗ падающего пучка в диапазоне от 2 до

3 результирующий ТЗ меняется от 2 до 3 и обратно 5 раз, а при изменении начального ТЗ от 3 до 4 – 3 раза.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

ТЗ пучка рассчитывался по формуле (1):

$$TC = \frac{1}{2\pi} \lim_{r \rightarrow \infty} \int_0^{2\pi} d\varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \arg E(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \lim_{r \rightarrow \infty} \operatorname{Im} \int_0^{2\pi} d\varphi \frac{\partial E(r, \varphi) / \partial \varphi}{E(r, \varphi)}. \quad (1)$$

В (1) ТЗ вычисляется по окружности бесконечного радиуса, но при моделировании мы будем вычислять ТЗ на окружностях разного радиуса, величина которого будет каждый раз указана. Параметры моделирования: размер начального поля 8×8 мкм, 400×400 отсчетов, длина волны $\lambda = 0,532$ мкм, радиус перетяжки гауссова пучка $w = 3$ мкм. Начальный ТЗ пучка был дробный:

$$E_x(r, \varphi) = \exp(-r^2/w^2 + i\mu\varphi) \quad (2)$$

и менялся в диапазоне $3 < \mu < 4$. Начальный гауссов пучок был умножен на сферическую функцию с радиусом $f = 10$ мкм. Реальное фокусное расстояние составило $z = 9,236$ мкм (на данном расстоянии наблюдается максимум интенсивности на оптической оси при $\mu = 0$). Таким образом, в фокусе линзы все значения рассчитаны на этом z . Поскольку ТЗ пучка рассчитывался на окружностях больших радиусов (до 140 мкм), которые больше, чем расстояние от перетяжки до плоскости наблюдения (10 мкм), то для получения адекватных значений ТЗ применялся непараксиальный расчет комплексной амплитуды светового поля с помощью интеграла Рэлея-Зоммерфельда.

Моделирование показало, что изменение ТЗ пучка с начальным дробным ТЗ происходит по-разному, если начальный ТЗ изменяется от нечетного к четному и от четного к нечетному. В тезисах приведен только случай изменения ТЗ в диапазоне от 3 до 4.

Далее все расчеты проведены на расстоянии $z = 9,236$ мкм, где формируется фокус при $\mu = 0$ (дальняя зона). На рис. 1 показана зависимость ТЗ от μ с шагом 0,01 в диапазоне $3 < \mu < 4$, вычисленный для сравнения на окружностях двух радиусов: $R = 8$ мкм (непрерывная линия), $R = 138$ мкм (пунктирная линия).

Из рис. 1 видно, что ТЗ меняется с 2 на 3 и обратно 3 раза. Детально это можно описать следующим образом. Вначале исходный ТЗ целый и равен 3, и конечный тоже равен 3. С увеличением ТЗ появляется так называемый оптический «диполь», состоящий из двух дислокаций, ТЗ при этом равен 3,12. Эти дислокации начинают расходиться относительно друг друга, одна из них с

зарядом +1 приближается к центру, вторая с ТЗ –1 уходит на бесконечность, и итоговый ТЗ пучка становится равным 4. При этом эти вихри находятся выше центра пучка, то есть в положительной части оси Y. В диапазоне от 3,12 до 3,18 ТЗ остается равным 4. Затем, при начальном ТЗ равным 3,18 появляется еще один оптический «диполь», который состоит из двух вихрей, один с зарядом +1, второй – с –1. Оба они находятся ниже центра координат, в отрицательной части оси Y. Вихрь с зарядом +1 уходит на бесконечность и перестает влиять на итоговый ТЗ пучка, остается только вихрь с ТЗ –1. ТЗ всего пучка падает обратно до значения 3, а новый вихрь постепенно приближается к центру пучка. Далее с ростом начального ТЗ от начала удаляются от центра. При начальном ТЗ 3,73 вновь появляется с периферии пучка тот вихрь с ТЗ +1, что туда ушел, вихри с ТЗ +1 и –1 соединяются в один диполь и когда они подходят друг к другу на расстоянии примерно $Y = -25$ мкм от центра пучка, то оба исчезают, ТЗ пучка снова становится равным 4. И далее в диапазоне от 3,74 до 4 ТЗ пучка остается равно 4. То есть, во-первых, видно, что действительно, появляются дополнительные вихри к основному, тому, что изменяет заряд пучка на 4 и остается в центре пучка с начального ТЗ от 3,12 и более. Во-вторых, эти вихри появляются парами, образуя «диполи», которые затем расходятся. Один из вихря – компонент диполя, уходит на периферию пучка и не влияет более на ТЗ, второй остается. Затем ушедший на периферию вихрь возвращается, компенсируя оставшийся ближе к центру, и они вместе пропадают.

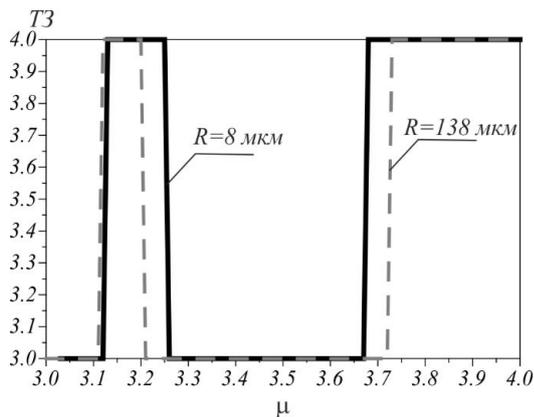


Рис. 1. Зависимость ТЗ от величины дробного заряда μ начального поля в диапазоне $3 < \mu < 4$ при расчете вдоль окружностей двух радиусов: $R = 8$ мкм (непрерывная линия) и $R = 138$ мкм (пунктирная линия)

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что при дробном начальном топологическом заряде пучка итоговый ТЗ всегда является целой величиной. Однако при определенной дробной части пучка в итоговом пучке, наблюдаемым на расстоянии Рэлея от начальной плоскости, в поле появляются дополнительные вихри парами. Они имеют заряд +1 и –1 и взаимно компенсируют друг друга. Когда

оба вихря находятся внутри рассматриваемой области, они не влияют на итоговый заряд пучка. Но с ростом начального ТЗ один из этих вихрей, составляющих «диполь», уходит на бесконечность, а второй остается в пучке, изменяя его ТЗ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595), а также при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ruffato, G. OAM-inspired new optics: the angular metalens. *Light / G. Ruffato // Sci. Appl.* – 2021. – Vol. 10(1). – P. 96.
- [2] Guo, Y. Spin-decoupled metasurface for simultaneous detection of spin and orbital angular momenta via momentum transformation / Y. Guo, S. Zhang, X. Luo // *Light Sci. Appl.* – 2021. – Vol. 10. – P. 63.
- [3] Jin, Z. Phyllotaxis-inspired nanosieves with multiplexed orbital angular momentum / Z. Jin, D. Janoschka, J. Deng, L. Ge, P. Dreher, B. Frank, G. Hu, J. Ni, Y. Yang, J. Li, G. Yu // *eLight.* – 2021. – Vol. 1. – P. 1.
- [4] Wei, D. Generating controllable Laguerre-Gaussian laser modes through intracavity spin-orbital angular momentum conversion of light / D. Wei, Y. Cheng, R. Ni, Y. Zhang, X. Hu, S. Zhu, M. Xiao // *Phys. Rev. Appl.* – 2019. – Vol. 11. – P. 014038.
- [5] Stella, V. Vortex beam generation by spin-orbit interaction with Bloch surface waves / V. Stella, T. Grogjeon, N. De Leo, L. Boarino, P. Munzard, J.R. Lakowicz, E. Descrovi // *ACS Photonics.* – 2020. – Vol. 7. – P. 774-783.
- [6] Arikawa, T. Transfer of optical angular momentum of light to plasmoni excitations in metamaterials / T. Arikawa, T. Hiraoka, S. Morimoto, F. Blanchard // *Sci. Adv.* – 2020. – Vol. 6(24). – P. 253.
- [7] Kotlyar, V.V. A dual-functionality metalens to shape a circularly polarized optical vortex or a second-order cylindrical vector beam / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, L. O'Faolain, M.V. Kotlyar // *Phot. Nanostr. Fund. Appl.* – 2021. – Vol. 43. – P. 100898.
- [8] Zhu, L. Optical vortex lattice: an exploitation of orbital angular momentum / L. Zhu, M. Tang, H. Li, Y. Tai, X. Li // *Nanophotonics.* – 2021. – Vol. 10(9). – P. 0139.
- [9] Fu, S. Universal orbital angular momentum spectrum analyser for beams / S. Fu, Y. Zhai, J. Zhang, X. Liu, R. Song, H. Zhou, C. Gao // *PhotoniX.* – 2020. – Vol. 1. – P. 19.
- [10] Fatkhiev, D.M. Recent advances in generation and detection of orbital angular momentum optical vortices. A Review / D.M. Fatkhiev, M.A. Butt, E.P. Grakhova, R.V. Katlyarov, I.V. Stepanov, N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, V.S. Luubopytov, A.K. Sultanov // *Sensors.* – 2021. – Vol. 21(15). – P. 4988.
- [11] Leach, J. Observation of the vortex structure of a non-integer vortex beam / J. Leach, E. Yao, M.J. Padgett // *New Journal of Physics.* – 2004. – Vol. 6. – P. 71.
- [12] Wen, J. Vortex strength and beam propagation factor of fractional vortex beams / J. Wen, L. Wang, X. Yang, J. Zhang, S. Zhu // *Optics Express.* – 2019. – Vol. 27(4). – P. 5893-5904.
- [13] Kotlyar, V.V. Topological charge of a linear combination of optical vortices: topological competition / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.V. Volynskiy // *Optics Express.* – 2020. – Vol. 28(6). – P. 8266-8281.
- [14] Налимов, А.Г. Моделирование формирования изображения зонной пластинкой в рентгеновском излучении / А.Г. Налимов, В.В. Котляр, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика.* – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 290-296.