УДК 535.42

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОГЛОЩАЮЩЕГО АКСИКОНА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДУЛЯЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА В ОБЛАСТИ БЕССЕЛЕВОГО ПУЧКА

А.Е. МАРТИРОСЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 10 февраля 2009 г.)

Исследованы модуляции в области бесселевого пучка, образованного в результате прохождения лазерного излучения через поглощающий аксикон. Изза преимущественного поглощения светового пучка в близлежащих к вершине областях поглощающего аксикона, подавляются пространственные модуляции и область бесселевого пучка становтся более гладкой и равномерной.

1. Введение

обладают особым свойством – Бесселевые пучки отсутствием расходимости в поперечных направлениях вдоль распространения когерентного светового пучка. Отметим, что истинные бесселевые пучки должны охватить все пространство, что, конечно, невозможно осуществить. Обычно, для получения бесселевых или, точнее, квази-бесселевых пучков первого порядка используются оптические элементы с конической поверхностью – аксиконы [1]. Однако могут тонко-вырезанные применяться также кольца, осветляемые лазерным излучением [2], и фазовые голограммы [3]. Для образования бесселевого пучка высокого порядка используются как фазовые дифракционные элементы [4], так и фазовые винты [5]. Бесселевые пучки могут образоваться и на выходе резонатора лазера при использовании соответствующих фазовых зеркал [6].

Бесселевые пучки широко используются для микроструктурирования прозрачных материалов [7], создания световых каналов с микронной толщиной [8], локализации атомов [9], оптического перемещения атомов и микрочастиц [10,11], исследования клеток [12], генерации гармоник [13,14] и т.д. Однако, изза отупленности вершин реальных аксиконов или в случае иных способов создания бесселевых пучков, возникают пространственные модуляции интенсивности света. Эти модуляции впервые были выявлены теоретически и подтверждены экспериментально в работах [2,15]. В [16,17] исследовались модуляции вдоль оптической оси аксикона из-за интерференции световых пучков, прошедших через центральные (близлежащие к вершине) и периферийные области реального аксикона. Отупленность вершины аксиконов играет немаловажную роль и при образовании пространственной контрастной структуры на дальних расстояниях от аксикона [18]. Для того чтобы сгладить пространственные модуляции, в работах [16,17] предлагается отсечь с помощью преграды (пространственного фильтра) лучи, исходящие из отупленной вершины аксикона. Однако этот способ имеет свои недостатки. Укорачивается длина пучка вдоль оси аксикона, а также резко уменьшается промежуток равномерного распределения света у осевого пика интенсивности. В то же время достижение равномерного, удлиненного осевого распределения света является важной задачей (см., например, [19,20]). Кроме того, на пиковой части распределения интенсивности сохраняются модуляции.

С целью уменьшить влияние отупленности вершины на область бесселевого пучка и сгладить пространственные модуляции, в данной работе предлагается использовать новый тип аксикона, так называемый поглощающий аксикон. Соответствующие расчеты показывают, что поглощающий аксикон, без дополнительных оптических элементов, значительно подавляет модуляцию интенсивности света в области образования бесселевого пучка и при этом увеличивает длину промежутка максимальной интенсивности света по оси аксикона.

2. Прозрачный аксикон

Сначала рассмотрим случай, когда гауссовое излучение с радиусом ио падает на прозрачный, идеальный (отсутствие отупленности у вершины) аксикон. После прохождения через аксикон световой пучок преобразовывается, и в определенной области пространства образуются бесселевые пучки. На рис.1а эти пучки представлены в виде жирных прямых линий. Фазовый фронт света у вершины аксикона представляет коническую поверхность [21,22]. На рис.1а координата *х* направлена вдоль фазового фронта, а *z* - по оптической оси аксикона, β- угол основания аксикона, γ- угол отклонения фазового фронта. Жирная линия, расположенная на оси *z*, представляет распределение интенсивности бесселевого пучка на оси аксикона. В случае идеального аксикона это распределение выражается следующим образом [16]:

$$F(z) \sim z \exp\left(-\frac{2z^2 \sin^2 \gamma}{w^2}\right). \tag{1}$$

Здесь w - радиус гауссового пучка сразу после прохождения аксикона. При относительно малых углах основания аксикона $w \approx w_0$.

На рис.2 жирной кривой представлено распределение интенсивности света вдоль оптической оси гауссового пучка с радиусом w=3 мм, прошедшего через идеальный аксикон с углом у основания $\beta = 15^{\circ}$. Угол у определяется из выражения $\gamma = \arcsin[(n/n_0)\sin\beta] - \beta$ [21], где $n_0=1$ и $n \approx 1.5$ (у стекол) – коэффициенты преломления света в вакууме и в аксиконе.

Рассмотрим случай прозрачного реального аксикона. Отупленность вершины реального аксикона можно охарактеризовать с помощью гиперболоида [16]. В этом случае в плоскости, в которой лежит оптическая ось аксикона, квазиконическая поверхность описывается как $z_0 = -\sqrt{a^2 + \rho^2} \tan^2 \beta$, где ρ пер-



Рис.1. а) Образование зоны бесселевого пучка после прохождения лазерного излучения через идеальный аксикон. Ось x направлена от вершины аксикона вдоль фазового фронта, а z - по оптической оси аксикона. b) Область отупленной вершины реального аксикона: жирная кривая RA характеризует сечение гиперболической поверхности аксикона по оптической оси, а RF - реальный фазовый фронт у вершины. a – расстояние между вершинами реального и идеального аксиконов. c) Прохождение света (с равномерно распределенной интенсивностью вдоль радиальных направлений) через поглощающий аксикон. Жирность стрелок характеризует интенсивность света в локальных областях. Центральные пучки в аксиконе ослабляются более существенно, чем периферийные.

пендикулярно оси *z*, а *a* – расстояние между вершинами реального и идеального аксиконов. В данной работе радиальная ось *x* не перпендикулрна оси *z*, однако и в этом случае местоположение любой точки (а также пучка света, проходящего через эту точку) на конической поверхности аксикона может определяться относительно этих осей. При этом из простых тригонометрических формул легко получить, что расстояние любой точки *z* от *O* равно *x*'sin β /cos(γ + β) (см. рис.1b). Таким образом, следующая гиперболическая функция характеризует сечение квазиконической поверхности реального аксикона по оптической оси: $z_0(x') = -\sqrt{a^2 + [(x'\sin\beta)^2/\cos^2(\gamma+\beta)]}$. В результате этого фазовый фронт света у вершины реального аксикона также характеризуется гиперболической функцией $(n-n_0)|z_0(x')|$; при этом пучки, прошедшие вблизи оси аксикона (центральные пучки), опережают по фазе периферийные пучки (рис.1b). Следовательно, опережение фазы относительно фронта идеального аксикона в зависимости от *x*' составляет $(n-n_0)[|z_0(x')|-x'\sin\beta/\cos(\gamma+\beta)]$. С учетом теории Гюйгенса–

Френеля, вдоль оси *z* амплитуду света, исходящего от всей фазовой поверхности аксикона, можно вычислить с помощью следующего интеграла [23]:

$$I(z) = \frac{iA_0}{2\lambda} \int_0^\infty \frac{2\pi x' f}{l(x', z)} \exp\left[\frac{(x')^2}{w^2}\right] \times \\ \times \exp\left[-\frac{2i\pi}{\lambda} \left\{ l(x', z) - \left[(n - n_0) |z_0(x')| - x' \frac{\sin\beta}{\cos(\gamma + \beta)}\right] \right\} \right] dx'.$$

$$(2)$$

Здесь $A_0 \exp\left[(x')^2/w^2\right]$ характеризует распределение амплитуды падающего гауссового пучка, λ - длина волны излучения. Интегрирование осуществляется по кольцам с толщиной dx' на фазовой поверхности, а $2\pi x' dx'$ - площадь кольца; f-коэффициент отклонения (inclining coefficient), который в данном случае равен $f = 1 + z \cos \gamma/l(x', z)$. Длина l(x', z), которая характеризует расстояние между произвольными точками x' и z, вычисляется по простой тригонометрической формуле $l(x', z) = \sqrt{(x')^2 + z^2 - 2x' z \sin \gamma}$.



Рис.2. Расчет распределения интенсивности света *F* на оси *z* после прохождения гауссового лазерного пучка через идеальный (жирная кривая) и реальный (тонкая кривая, при *a*= 0.2 мм) аксиконы. Радиус лазерного пучка – 3 мм, угол у основания аксикона – 15°.

На рис.2 тонкой линией представлены расчеты распределения интенсивности света F вдоль оптической оси при a=0.2 мм (случай заведомо несовершенного аксикона), $\lambda=633$ мм, w=3 мм, $\beta=15^{\circ}$. Распределение имеет значительную пространственную модуляцию (глубина модуляции до 0.16), что связано с интерференцией центральных и периферийных пучков, прошедших через аксикон.

3. Поглощающий аксикон

Принцип работы поглощающего аксикона иллюстрируется с помощью рис.1с. Пусть на аксикон падает свет с равномерно распределенной интенсивностью вдоль радиальных направлений (плоская волна). Ясно, что пучки, распространяющиеся вблизи оптической оси аксикона (центральные пучки), проходят в аксиконе более длинный путь, чем пучки, прошедшие через периферийную часть аксикона. Следовательно, центральные пучки ослабляются сильнее. Таким образом, пространственное распределение интенсивности пучка после прохождения через поглощающий аксикон резко меняется. Из представленных рассуждений следует, что, в зависимости от оптической плотности аксикона, можно контролировать интенсивность света, исходящего от отупленной вершины, и при необходимости почти полностью подавить ее.



Рис.3. Расчет распределения интенсивности света F на оси z после прохождения гауссового лазерного пучка через поглощающий аксикон при k=1 мм⁻¹ (тонкая кривая) и k=1.6 мм⁻¹ (жирная кривая). Интенсивность света при k=1.6 мм⁻¹ умножена на 4. Радиус лазерного пучка – 3 мм, угол у основания аксикона – 15°, a=0.2 мм.

Если на поглощающий аксикон падает гауссовый пучок, то картина распределения интенсивности, прошедшего через него, усложняется. Но основной принцип ослабления центральных пучков осуществляется и в этом случае. Пусть k - коэффициент поглощения света в аксиконе, а z_1 - высота аксикона (рис.1с). Тогда ослабление пучка света по оптической оси аксикона равно $g_1 = \exp(-|z_1|k)$. Для пучков, прошедших через аксикон на некотором радиальном расстоянии от оси z, ослабление определяется из выражения

$$g(x') = \exp\left\{-\left[|z_1| - \frac{x'\sin\beta}{\cos(\gamma+\beta)}\right]k\right\}.$$
(3)

Таким образом, распределение амплитуды падающего гауссового пучка на конической поверхности поглощающего аксикона имеет вид

$$A_{0} \exp\left[\frac{(x')^{2}}{w^{2}}\right] g(x')^{1/2} = A_{0} \exp\left[\frac{(x')^{2}}{w^{2}} \exp\left\{-\left[|z_{1}| - \frac{x'\sin\beta}{\cos(\gamma+\beta)}\right]\frac{k}{2}\right\}\right].$$
 (4)

Расчет, выполненный по формуле (2) с учетом (4), показывает, что модуляция интенсивности света значительно подавляется при использовании поглощающих аксиконов с коэффициентами поглощения k=1 мм⁻¹ и, особенно, k=1.6 мм⁻¹ (см. рис.3). При этом, с увеличением значения k область максимальной интенсивности пучка (область, где интенсивность света падает не более 10% по сравнению с пиковым значением) смещается дальше от вершины аксикона, а общая интенсивность света, прошедшего через аксикон, падает. При k=1.6 мм⁻¹ в области максимальной интенсивности света (на расстоянии примерно 12–20 мм от вершины аксикона) глубина модуляций составляет не более 0.02.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследованы пространственные модуляции лазерного излучения в области образования бесселевых пучков. Эти модуляции образуются из-за несовершенства изготовления аксиконов у вершины. Показано, что поглощающий аксикон подавляет лазерные пучки, которые проходят через его центральную часть. В результате этого интенсивность излучения из близлежащих к вершине аксикона областей падает, а глубокие модуляции подавляются и сдвигаются в область крыла распределения интенсивности света по оси аксикона. Это приводит к уменьшению глубины модуляций и сглаживанию интенсивности света в области образования бесселевых пучков.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. G.Indebetow. JOSA A, 6, 150 (1989).
- 2. J.Durnin, J.J.Miceli, J.H.Eberly. Phys. Rev. Lett., 58, 1499 (1987).
- 3. J.Trunen, A.Vasara, A.T.Friberg. Appl. Optics, 27, 3959 (1988).
- 4. S.Sogomonian, U.T.Schwarz, M.Maier. JOSA B, 18, 497 (2001).
- 5. Н.Е.Андреев, С.С.Бычков, В.В.Котряр и др. Квант. электроника, 23, 130 (1996).
- 6. A.Hakola, S.C.Buchter, T.Kajava, et al. Opt. Comm., 238, 335 (2004).
- 7. J.Amako, D.Sawaki, E.Fujii. JOSA B, 20, 2562 (2003).
- 8. J.Jezek, T.Cizmar, V.Nedela. Opt. Express, 14, 8506 (2006).
- 9. L.Cacciapuoti, M. de Angelis, G.Pierratini, L.Ricci, G.M.Tino. Eur. Phys. J. D, 14, 373 (2001).
- 10. S.Schmid, G.Thalhammer, K.Winker, et al. New J. Phys., 8, 1 (2006).

- 11. B.P.S.Ahluwalia, X.-C.Yuan, S.H.Tao, et al. Appl. Phys. Lett., 87, 084104 (2005).
- 12. X.Tsampoula, V.Garces-Chaves, et al. Appl. Phys. Lett., 91, 053902 (2007).
- 13. C.Altucci, R.Bruzzese, C. de Lisio, A.Porzio, et al. Opt. Lasers Eng., 37, 565 (2002).
- 14. V.E.Peet, R.V.Tsubin. Phys. Rev. A, 56, 1613 (1997).
- 15. J.Durnin. JOSA A, 4, 651 (1987).
- 16. O.Brzobohatə, T.Cižmór, P.Zemónek. Opt. Express, 16, 12688 (2008).
- 17. S.Akturk, B.Zhou, B.Pasquiow, et al. Opt. Comm., 281, 4240 (2008).
- 18. B.Depret, Ph.Verkerk, D.Hennequin. Opt. Comm., 211, 31 (2002).
- 19. N.Devidson, A.A.Friesem, E.Hasman, Opt. Comm., 88, 326 (1992).
- 20. A.Thaning, A.Friberg, Z.Jaroszewicz. Opt. Lett., 26, 1648 (2001).
- 21. A.E.Martirosyan, C.Altucci, C. de Lisio, A.Porzio, et al. JOSA A, 21, 770 (2004).
- 22. А.Е.Марторосян. Изв. НАН Армении, Физика, 43, 182 (2008).
- 23. М.Борн, Э.Вольф. Основы оптики. М., Наука, 1973.

ԿԼԱՆՈՂ ԱՔՍԻԿՈՆԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ԲԵՍՍԵԼՅԱՆ ՓՆՋԻ ԱՌԱՋԱՑՄԱՆ ՇՐՋԱՆՈՒՄ ԼՈՒՅՍԻ ԻՆՏԵՆՍԻՎՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԱԾԱԿԱՆ ՄՈԴՈՒԼՅԱՑԻԱՆԵՐԸ ՉԵՋՈՔԱՑՆԵԼՈՒ ՀԱՄԱՐ

Ա.Ե. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

Հետազոտված է Բեսսելյան փնջի առաջացման տիրույթը, որը ի հայտ է գալիս լազե-րային փունջը կլանող աքսիկոնի միջով անցնելու հետևանքով։ Աքսիկոնի գագաթին մոտ շրջաններում առավելապես լույսի կլանման շնորհիվ, չեզոքացվում են տարածական մոդու-լյացիաները և Բեսսելյան փնջի առաջացման շրջանը դառնում է ավելի հարթ և հավասա-րաչափ։

USING AN ABSORBING AXICON FOR SURPRESSING SPATIAL MODULATIONS OF LIGHT INTENSITY IN THE BESSEL BEAM REGION

A.E. MARTIROSYAN

Light intensity modulations in the Bessel beam region which are formed due to the passage of laser beam radiation through an absorbing axicon are studied. Due to dominating absorption of light beam in the axicon's regions close to its tip, light intensity spatial modulations are suppressed and the region of Bessel beam becomes more smooth and uniform.