

УДК 535.8

ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ АКСИКОНОВ С МАКСИМАЛЬНЫМИ ФОКУСНЫМИ ОТРЕЗКАМИ

© В. И. Наливайко¹, М. А. Пономарева^{1,2}

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: nalivaiiko@iae.nsk.su

Экспериментально показана возможность изготовления плёночных аксиконов с фокусными отрезками большой величины. Технология изготовления включает вакуумное напыление слоёв халькогенидного стекла переменной толщины, которая линейно изменяется в зависимости от радиуса подложки. Получены аксиконы с фокусными отрезками до 15 м.

Ключевые слова: аксикон, халькогенидное стекло, вакуумное напыление, тонкие плёнки.

DOI: 10.15372/AUT20200410

Введение. Аксиконы — оптические элементы с конической поверхностью, формирующие протяжённый фокусный отрезок. Их можно условно разделить на две группы по длине фокусного отрезка. Аксиконы с короткими фокусными отрезками (от микронов до сантиметров) находят применение в таких приложениях, как оптические ловушки для захвата частиц [1, 2], лазерное гравирование поверхностей [3], оптические системы с увеличенной глубиной фокуса [4, 5] и др. Для таких аксиконов характерны большие углы при основании конуса (10–30°).

Аксиконы с длинными фокусными отрезками более десяти метров могут применяться в измерительных приборах для контроля прямолинейности протяжённых объектов в строительстве, станко- и судостроении и других крупногабаритных производствах. Но такие аксиконы должны иметь при основании очень малые углы — порядка угловых секунд, которые сложно изготовить стандартными средствами. Один из способов решения этой проблемы — использование дифракционной оптики. С помощью линзакона были получены фокусные отрезки от 2 до 60 м [6, 7], а с помощью отражательного дифракционного аксикона — до 50 м [8]. Но дифракционные элементы сложны в изготовлении, особенно при необходимости достижения высокой эффективности.

Цель данной работы — создание плёночных аксиконов, которые являются объёмными элементами с толщинами в несколько микрон и предельно малыми углами при основании конуса.

Теоретическая часть. Принципиальная схема работы аксикона изображена на рис. 1. В пространстве за аксиконом выделяют ближнюю и дальнюю области. В ближней области аксикон образует узкий протяжённый фокусный отрезок. В дальней области формируются кольца, у которых при увеличении расстояния ширина остаётся постоянной, а диаметр растёт. Предметом нашего исследования является формирование фокусных отрезков в ближней области.

Длина фокусного отрезка L определяется углом при основании аксикона α , показателем преломления n материала, из которого изготовлен, а также радиусом пучка света,

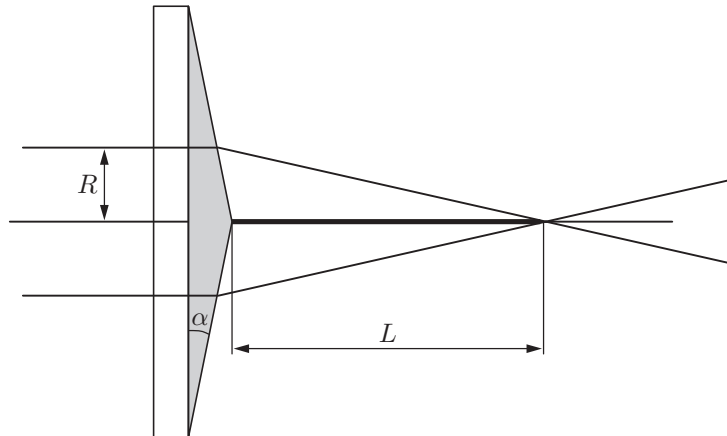


Рис. 1. Принципиальная схема работы аксикона в ближней области

падающего на аксикон R [9]:

$$L = \frac{R}{(n-1)\alpha}. \quad (1)$$

Распределение интенсивности в поперечном сечении фокусного отрезка аксикона имеет вид функции Бесселя нулевого порядка первого типа [10] и не меняется на всей его протяжённости. Такие «бездифракционные» пучки называются бесселевыми. Диаметр центрального пятна бесселева пучка определяется из положения первого минимума функции Бесселя [9]:

$$d = \frac{2,4\lambda}{\pi\alpha(n-1)}. \quad (2)$$

Для изготовления плёночных аксиконов с помощью вакуумного напыления необходимо использовать маску с определённым профилем перед вращающейся подложкой. Расчёт формы маски осуществляется исходя из предположения, что в высоком вакууме происходит прямолинейное распространение молекул испаряемого вещества от источника испарения при равномерной концентрации их в пределах некоторого телесного угла. Если мы имеем точечный источник испарения, значительно удалённый от поверхности сравнительно большого радиуса, то можно в первом приближении исходить из равномерности получения слоя при отсутствии маски. Толщина слоя на расстоянии r от центра маски пропорциональна времени напыления, т. е. пропорциональна длине дуги отверстия маски на данном расстоянии. Для напыления слоя с линейным изменением толщины форма маски в первом приближении имеет вид кардиоиды в полярных координатах:

$$r = 1 - \cos \varphi.$$

Кардиоида представлена на рис. 2, *a*, а рассчитанный профиль толщины слоя, напылённого через такую маску, показан сплошной кривой на рис. 2, *b*, а пунктирной линией показана линейная зависимость. Видно, что такая маска не даёт линейного распределения на краях и в центре, поэтому реальная маска была скорректирована (рис. 2, *c*).

Экспериментальная часть. Плёночный аксикон изготавливался вакуумным напылением халькогенидной плёнки состава As_2S_3 на подложку из плавленого кварца. Требуемая линейная зависимость толщины плёнки от радиуса обеспечивалась с помощью маски толщиной 50 мкм (см. рис. 2, *c*), расположенной на расстоянии 1 мм от подложки. Скорость

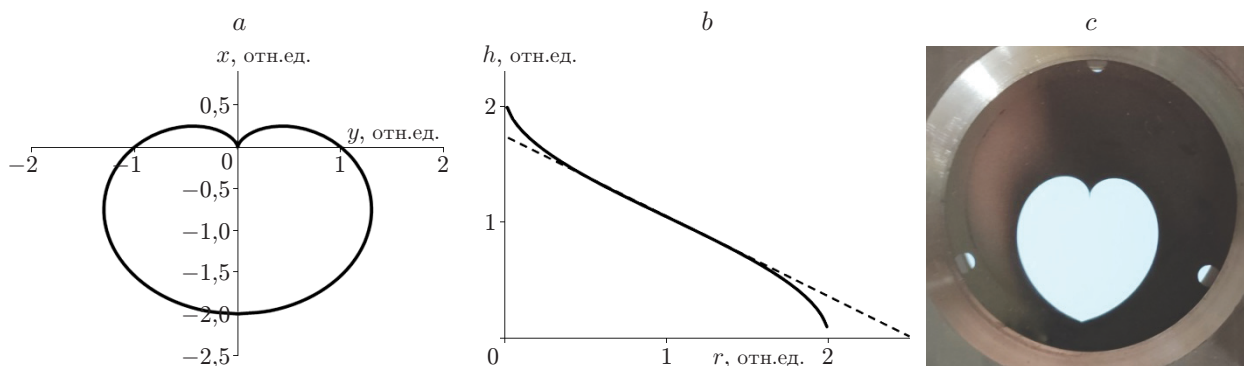


Рис. 2. Выбор формы маски: *a* — график кардиоиды, *b* — рассчитанный профиль толщины слоя от радиуса подложки при напылении через маску (сплошная кривая) и его линейная аппроксимация (пунктирная линия), *c* — фотография реальной маски для получения линейного профиля

Таблица 1

Рассчитанные и измеренные параметры аксикона ($\lambda = 0,63$ мкм, $n = 2,7$, $R = 10$ мм)

Толщина аксикона в центре, мкм	Диаметр аксикона, мм	Угол аксикона, угл. мин	Длина фокусного отрезка, м		Диаметр центрального пятна, мм	
			Расчёт	Измерение	Расчёт	Измерение
1	25	0,28	74	15	3,5	1,5
5	25	1,4	15	8,5	0,7	0,2

вращения подложки составляла 7 об./мин относительно неподвижной маски. Расстояние от испарителя до подложки 13 см. Толщина халькогенидного слоя изготовленного образца уменьшалась от центра к периферии.

Экспериментальные образцы аксиконов толщиной в центре 1 и 5 мкм изготавливались на подложках из плавленого кварца диаметром 25 мм. В табл. 1 приведены рассчитанные по формулам (1), (2) и экспериментально измеренные длины фокусных отрезков, а также диаметры центральных пятен полученных аксиконов.

Минимальный угол изготовленного аксикона составил $17''$ или $8 \cdot 10^{-5}$ рад. Из таблицы видно, что и длины фокусных отрезков, и диаметры центральных пятен получились существенно меньше рассчитанных. Это можно объяснить изменением показателя преломления плёнки по её толщине в процессе напыления. К тому же любые отклонения профиля от линейного играют большую роль для таких предельно малых значений углов аксиконов. Нелинейность фазового профиля формирует дополнительную фокусирующую линзу, что приводит как к уменьшению фокусного отрезка, так и к увеличению концентрации световой энергии в его центре.

На рис. 3 даны фотографии аксиконов толщиной в центре 1 и 5 мкм, полученные в отражённом и проходящем свете. Линейный фазовый профиль должен формировать кольца одинаковой ширины. Аксикон с толщиной 1 мкм имеет отклонение от линейности в центре и на краю, в то время как аксикон толщиной 5 мкм имеет более однородную структуру колец, что приближает его параметры к расчётным.

Измерение профиля поверхности аксикона проводилось с помощью интерференционной методики, используемой для определения профилей тонких плёнок [11] на лазерном интерферометре ФТИ-100PS, разработанном в ИАиЭ СО РАН [12]. На рис. 4 приведены

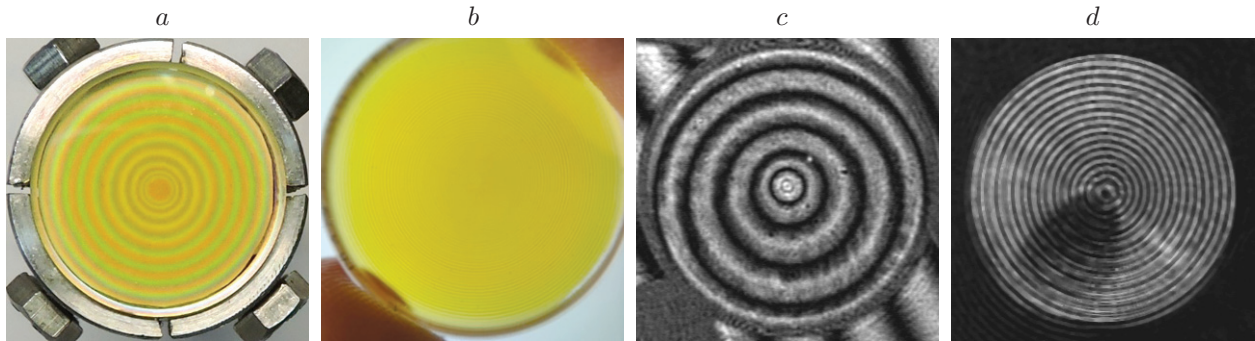


Рис. 3. Примеры аксиконов из халькогенидного стекла As_2S_3 на подложке диаметром 25 мм: *a, b* — в отражённом белом свете; *c, d* — в проходящем свете с $\lambda = 0,63$ мкм. Толщины аксиконов в центре 1 мкм (*a, c*) и 5 мкм (*b, d*)

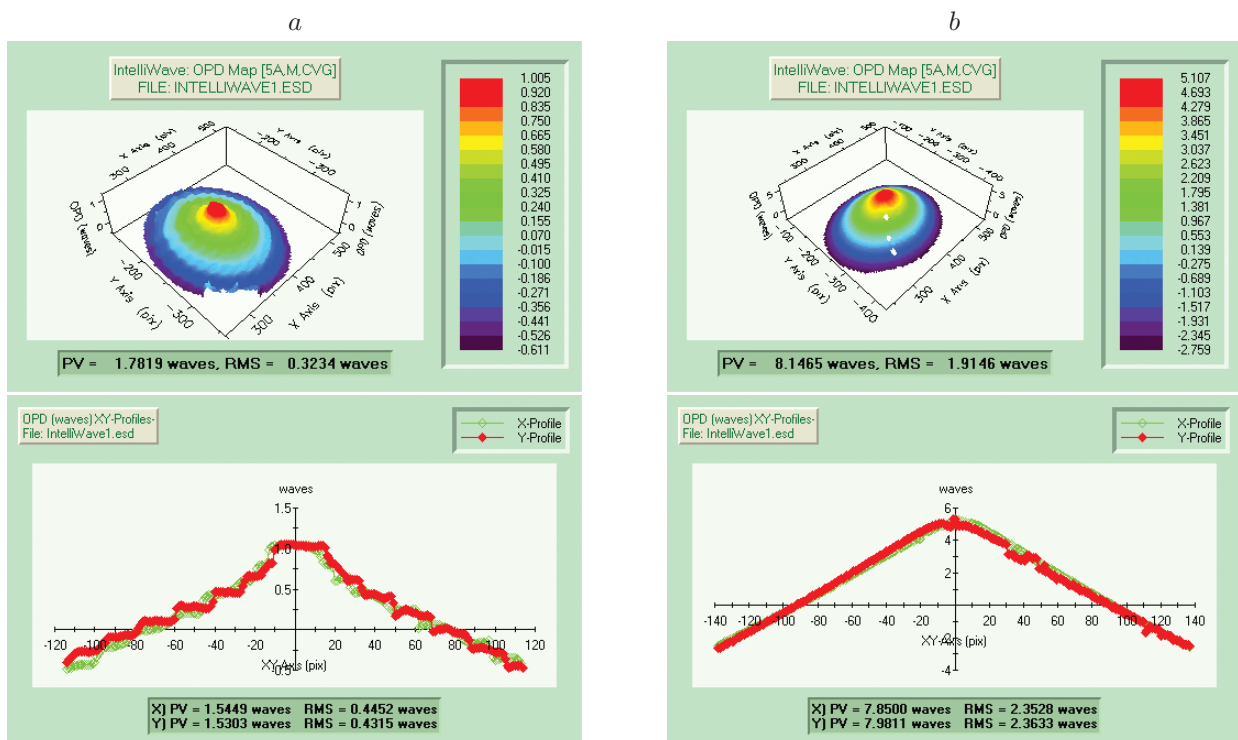


Рис. 4. Профилограммы аксиконов, полученные с помощью лазерного интерферометра ФТИ-100PS: с толщиной в центре 1 мкм (*a*) и 5 мкм (*b*)

результаты измерений. На профилограммах видны локальные дефекты профиля, которые связаны с неравномерным потоком вещества в процессе напыления, а также с недостаточно точной центрировкой маски. Предполагается устранение этих недостатков путём автоматизации процессов напыления слоёв [13], а также выбора оптимального положения маски.

На рис. 5 приведены фотографии поперечного сечения пучков для аксикона толщиной 1 мкм на расстоянии 6 м от вершины для различных диаметров падающих пучков. Диаметры центрального пятна фокусного отрезка остаются постоянными при изменении апертуры падающего пучка в 5 раз, что экспериментально подтверждает «бездифракционную» природу формируемых аксиконом бесселевых пучков.

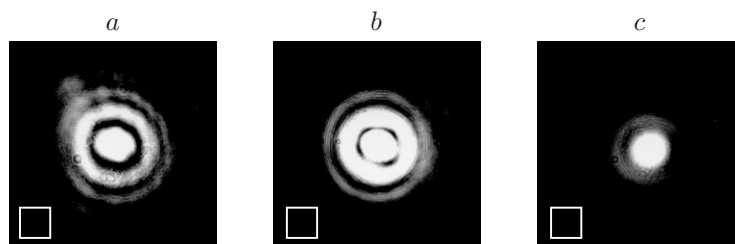


Рис. 5. Размер фокусного пятна на расстоянии 6 м от аксикона для различных диаметров D падающих пучков с $\lambda = 0,64$ мкм: $D = 2,5$ см (а); $D = 0,8$ см (b); $D = 0,4$ см (с) (масштаб представлен квадратом со стороной 1 мм)

Обсуждение результатов. Результаты эксперимента показали, что полученные аксиконы с толщиной в центре 1 и 5 мкм формируют «бездифракционные» фокусные отрезки длиной 15 и 8,5 м соответственно. Значительное несоответствие длины фокусного отрезка аксикона с толщиной 1 мкм расчётной величине позволяет предположить, что изготовление аксикона с оптической толщиной 4–5 длин волн является предельным для выбранных условий напыления. Большое время напыления аксикона толщиной 5 мкм усредняет влияние флуктуаций потока напыляемого материала, и в результате получаем более качественный линейный профиль толщины аксикона.

Для создания плёночных аксиконов с параметрами, близкими к расчётным, необходимо усовершенствование условий процесса напыления через маску: реализация более точной центрировки маски и подложки, коррекция формы маски, постоянная скорость напыления. В частности, автоматизация процесса напыления, проводимая нами в настоящее время [13], позволит обеспечить постоянство скорости напыления.

Заключение. Аксиконы с фокусными отрезками до 100 м предназначены для применения в лазерных измерителях непрямолинейности крупногабаритных изделий. Технология вакуумного напыления через маску для получения плёночных аксиконов является привлекательной с точки зрения стоимости и простоты изготовления.

Созданы и экспериментально апробированы тонкоплёночные аксиконы с рабочим диаметром 25 мм толщиной в центре 1 и 5 мкм из халькогенидного стекла состава As_2S_3 . При напылении использовалась маска с профилем в виде модифицированной кардиоиды. Такие плёночные аксиконы имели фокусные отрезки длиной 15 и 8,5 м и диаметры центрального пятна 1,5 и 0,2 мм. Расхождение расчётных и экспериментальных параметров связано с несовершенством условий напыления. Сформулированы требования к процессу напыления для получения более качественных аксиконов.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № АААА-А17-117053110007-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cheong W. C., Ahluwalia B. P. S., Yuan X.-C. et al. Fabrication of efficient microaxicon by direct electron-beam lithography for long nondiffracting distance of Bessel beams for optical manipulation // Appl. Phys. Lett. 2005. **87**. 024104.
2. Kampmann R., Chall A. K., Kleindienst R., Sinzinger S. Optical system for trapping particles in air // Appl. Opt. 2014. **53**. P. 777–784.
3. Wu P., Sui Ch., Huang W. Theoretical analysis of a quasi-Bessel beam for laser ablation // Photon. Res. 2014. **2**. P. 82–86.
4. Ding Zh., Ren H., Zhao Y. et al. High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens // Opt. Lett. 2002. **27**, N 4. P. 243–245.

5. **Rongwen L., Masashi T., Minoru K., Na J.** 50 Hz volumetric functional imaging with continuously adjustable depth of focus // Biomed. Opt. Exp. 2018. **9**, N 4. P. 1964–1976.
6. **Koronkevich V. P., Mikhaltsova I. A., Churin E. G., Yurlov Yu. I.** Lensacon // Appl. Opt. 1995. **34**, N 25. P. 5761–5772.
7. **Коронкевич В. П., Михальцова И. А., Чурин Е. Г., Юрлов Ю. И.** Дифракционный элемент для “обострения” лазерных пучков // Автометрия. 1994. № 3. С. 57–68.
8. **Fujiwara Sh.** Fresnel conic mirror // JOSA. 1961. **51**, N 15. P. 1305.
9. **Weber N., Spether D., Seifert A., Zappe H.** Highly compact imaging using Bessel beams generated by ultraminiaturized multi-micro-axicon systems // JOSA A. 2012. **29**. P. 808–816.
10. **Durnin J., Miceli J. J., Jr., Eberly J. H.** Diffraction-free beams // Phys. Rev. Lett. 1987. **58**. P. 1499–1501.
11. **Chen Q., Zhang Y., Qiu Ch. et al.** Method for measuring the cone angle and the shape of the axicon simultaneously using computer-generated holograms // Appl. Opt. 2015. **54**. P. 8290–8292.
12. **Полещук А. Г., Насыров Р. К., Маточкин А. Е. и др.** Лазерная интерферометрическая система для производственного контроля оптических изделий // Тр. Междунар. конф. «Прикладная оптика-2012». С.-Пб., 2012. С. 137–141.
13. **Наливайко В. И., Пономарева М. А.** Автоматизированное напыление аморфных халькогенидных слоёв // Тр. XV Междунар. выставки и науч. конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь». Новосибирск: Изд-во СГУГиТ, 2019. С. 64–68.

Поступила в редакцию 15.06.2020

После доработки 28.06.2020

Принята к публикации 28.06.2020
