

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

- 3 **Оптические схемы на основе конических элементов для формирования протяженных плазменных каналов в атмосфере**  
Агейчик А.А., Белобрагин Б.А., Резунков Ю.А., Савельева В.П., Степанов В.В.
- 8 **Исследование влияния самопоглощения в эрозионной лазерной плазме Ge, In, Pb, Ga, Si на ее спектральные характеристики**  
Чучман М.П., Шуаибов А.К.
- 14 **Зависимость биологической активности низкоинтенсивного лазерного излучения от частоты его модуляции**  
Плавский В.Ю., Барулин Н.В.

### ИКОНИКА – НАУКА ОБ ИЗОБРАЖЕНИИ

- 23 **Пространственно-частотные функции цветковых каналов органа зрения**  
Васьковский А.А.

### ГОЛОГРАФИЯ

- 29 **Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии**  
Корешев С.Н., Никаноров О.В., Козулин И.А.

### ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

- 35 **Адаптивные линзы на основе жидких кристаллов**  
Невская Г.Е., Томилин М.Г.
- 49 **Волоконный интерферометр Маха–Цендера для измерений спектральных характеристик одночастотных полупроводниковых лазеров диапазона 1,32 мкм и 1,55 мкм**  
Булгакова С.А., Дмитриев А.Л.
- 54 **Анализ требований к приемникам излучения для оптической камеры поля космического телескопа Т-170М проекта «Спектр-УФ»**  
Мельников В.Г., Шугаров А.С.
- 62 **Прецизионные дальномеры на основе двухволнового инжекционного лазера**  
Козлов В.Л.

- 67 **Решение проблемы точного позиционирования объекта в лазерном сканирующем дифференциально-фазовом аберрометре**  
Григорук В.И., Пильгун Ю.В., Смирнов Е.Н.
- 74 **Особенности применения ПЗС-фотоприемников в акусто-оптических средствах обработки информации**  
Шибав С.С.

## **ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ**

- 78 **Анизотропия оптических свойств и неоднородность пластически деформированных кристаллов германия**  
Рошак Е.Н., Ширшнев П.С., Пржевуский А.К.
- 83 **Исследование процесса полирования поликристаллического селенида цинка с использованием полировальных смол на основе канифоли**  
Гаврищук Е.М., Вилкова Е.Ю., Тимофеев О.В., Кушнир С.Р., Радбиль Б.А.
- 90 **Особенности полупроводниковых материалов как оптических сред для инфракрасной области спектра**  
Астафьев Н.И., Несмелова И.М., Несмелов Е.А.

## **ИНФОРМАЦИЯ**

- 94 **Коллективная монография “Оптика наноструктур”**
- 95 **Монография “Оптические методы визуализации газовых потоков”**
- 96 **Монография “Выдающиеся русские ученые М.В. Ломоносов, Д.С. Рождественский, С.И. Вавилов и научная школа Государственного оптического института”**

---

Сдано в набор 24.06.08. Подписано в печать 00.00.08. Формат бумаги 60×84/8.

Бумага офсетная № 1. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Заказ № 00. Отпечатано в ООО «ЦТТ». Тираж 300 экз. Цена подписная.

Адрес типографии: 199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 16.

Качество графических материалов соответствует представленным оригиналам.

---

Научный редактор **О. Н. Кононова**

Корректор **Э.А. Рождественская**

# ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 535.31.2:535.42

## ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ НА ОСНОВЕ КОНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ В АТМОСФЕРЕ

© 2008 г. А. А. Агейчик\*, Б. А. Белобрагин\*\*, доктор техн. наук; Ю. А. Резунков\*, доктор техн. наук;  
В. П. Савельева\*, В. В. Степанов\*, канд. физ.-мат. наук

\* ФГУП НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, Сосновый Бор, Ленинградская область

\*\* ФГУП “ГНПП “Сплав”, Тула  
E-mail: yuri@sbor.net

Рассмотрена нетрадиционная формирующая оптическая схема для генерации протяженных плазменных каналов в атмосфере с использованием импульсных  $\text{CO}_2$ -лазеров, состоящая из выпуклого зеркального аксикона с прямолинейной образующей и ретранслирующей схемой из 2-х сферических оптических элементов. Схема позволяет формировать перетяжку Бесселева пучка на значительном удалении от аксикона. Предложена аналитическая модель расчета разработанной оптической схемы.

Коды OCIS: 120.4820, 140.3300.

Поступила в редакцию 20.03.2008.

### Введение

Формирование протяженных фокальных распределений лазерного пучка с заданным пространственным распределением интенсивности имеет большое практическое значение для решения ряда научно-технических задач. К таким задачам относятся: генерация протяженных (до 100 м) плазменных каналов в атмосфере [1] для разработки лазерных систем управления молниевым разрядом, а также создание лазерных ускорителей электронов [2], отличительной особенностью которых является высокий темп ускорения, контролируемый режим, высокая яркость ускоренного пучка, а также его качество.

При этом должны использоваться лазеры с большой энергией излучения в импульсе [3] и короткой длительностью импульса [4], а протяженная перетяжка лазерного пучка должна формироваться на значительном удалении от формирующей оптической схемы (ФОС). В частности, таким лазером может быть тераваттный пикосекундный  $\text{CO}_2$ -лазер [5].

Известно, что одним из средств, позволяющих создавать протяженные фокальные распределения с плавным распределением интенсивности излучения вдоль оси фокусировки (Бесселевы пучки), являются конические оптические элементы (аксиконы). Особенностью аксиконной фокусировки является “боковая” подводка излучения к перетяжке. Это свойство позволяет значительно снизить влияние экранировки лазерного пучка возникаю-

щей плазмой на формирование сплошного плазменного канала [6].

В данной работе описана ФОС, позволяющая формировать Бесселевы пучки с различным удалением области концентрации излучения от конического элемента без изменения угла раскрытия аксикона. ФОС состоит из зеркального аксикона и ретранслирующей системы, собранной из традиционных оптических элементов. Модель системы рассчитана теоретически с использованием формализма матриц ABCD. Проведенные эксперименты по формированию плазменного канала в атмосфере позволили проверить как предложенный метод формирования плазменного канала, так и метод расчета ФОС.

### Расчетная модель

В рамках рассматриваемой модели ФОС можно сформулировать ряд исходных положений как основу теоретических расчетов. Во-первых, для формирования протяженных фокальных распределений обычно используются аксиконы с малым углом отклонения лучей от оптической оси ( $1^\circ$  и менее). По этой причине можно воспользоваться математическим аппаратом расчета оптических схем в параксиальном приближении. Во-вторых, можно существенно расширить возможности применения аксиконов, если формируемые ими пучки преобразовывать оптической схемой, составленной из традиционных оптических элементов. В-третьих, для

универсализации процедуры расчета ФОС можно использовать формализм матриц ABCD [7], который позволяет в весьма простой форме выразить основные интегральные соотношения, возникающие при решении подобных задач. В своих расчетах авторы ограничивались вычислением интенсивности световых полей только на оптической оси системы.

Рассмотрим случай освещения аксикона монохроматической волной, распространяющейся вдоль

оптической оси  $Z$ . Множитель  $\exp(-i\omega t)$  опускался и волна характеризовалась двумерным скалярным распределением  $U(x, y)$  на отсчетных плоскостях  $Z = \text{const}$ . В рамках скалярной теории оптическую систему можно охарактеризовать функцией отклика, позволяющей рассчитывать по заданному распределению поля  $U_0(x, y)$  на входной плоскости распределение в точке  $P$  на оси системы в выходной плоскости [8]

$$U(P) = \exp(ikL_0)/(i\lambda B) \iint U_0(x, y) \exp(ikA(x^2 + y^2)/2B) dx dy, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $A, B$  – элементы лучевой матрицы оптической системы, расположенной между аксиконом и выходной плоскостью,  $L_0$  – измеренная вдоль оси оптическая длина системы. Интегрирование производится по всей освещенной части поверхности аксикона. Распределение поля  $U_0(x, y)$  на входной плоскости для случая аксикона с прямолинейной образующей задается выражением

$$U_0(x, y) = E_0(x, y) \exp(ik\alpha\sqrt{x^2 + y^2}), \quad (2)$$

где  $E_0(x, y)$  – амплитуда падающей волны,  $\alpha$  – угол отклонения аксиконом осевого пучка. Отрицательный знак  $\alpha$  соответствует собирающему аксикону (волновые фронты сходятся к оси), положительный знак  $\alpha$  соответствует рассеивающему аксикону (волновые фронты удаляются от оси).

При проведении расчетов интенсивности излучения  $I(P) = |U(P^2)|$  представляют интерес только те точки наблюдения, которые находятся в пределах некоторого интервала вдоль оси  $Z$  с координатами  $L_1$  и  $L_2$ . Дело в том, что из-за ограниченности апертуры входного пучка участок фокального распределения, в котором происходит основная концентрация излучения (протяженность Бесселева пучка), тоже ограничен. Хорошие результаты при определении  $L_1$  и  $L_2$  дают геометрические вычисления координат точек пересечения крайних лучей апертуры, входящих в преобразующую схему под углом  $\alpha$  (в случае освещения аксикона коллимированным пучком). Для удобства расчетов следует разделить полную схему преобразования на 2 части, одна из которых оканчивается последним сферическим элементом и описывается матрицей  $A_0B_0C_0D_0$ , а другая является участком  $L$  свободного

пространства. В соответствии с правилами вычислений лучевых матриц

$$A = A_0 + B_0L, \quad (3a)$$

$$B = B_0 + D_0L. \quad (3b)$$

В частном случае освещающего пучка в виде рамки с внешним размером  $d_1$  и внутренним  $d_2$  удаление точек пересечения  $z_1$  и  $z_2$  крайних лучей с осью  $Z$  от схемы  $A_0B_0C_0D_0$  равны

$$z_i = -(A_0d_i/2 + B_0\alpha)/(C_0d_i/2 + D_0\alpha), \quad (4)$$

где  $i = 1, 2$ . При этом знаки углов и расстояний [7] в направлении хода лучей имеют положительные значения. Тогда границы области наблюдения  $L_1$  и  $L_2$ , в которых следует вычислять интеграл (1), определяются

$$L_1 = \min(z_1, z_2), \quad (5a)$$

$$L_2 = \max(z_1, z_2). \quad (5b)$$

В зависимости от параметров преобразующей схемы возможны ситуации, когда  $L_1 < 0$ , а  $L_2 > 0$ . Это соответствует случаю, когда часть перетяжки Бесселева пучка находится внутри схемы  $A_0B_0C_0D_0$ . При  $L_2 < 0$  на выходе схемы  $A_0B_0C_0D_0$  перетяжка Бесселева пучка не наблюдается. Оба последних случая практического интереса не представляют.

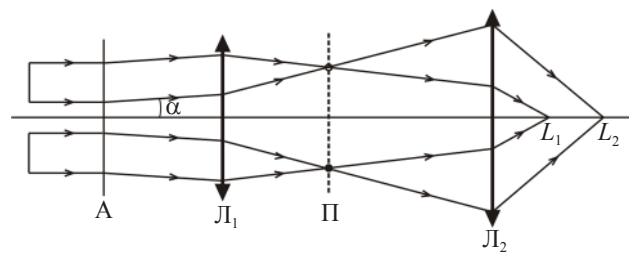
## Экспериментальная схема

Эквивалентная оптическая схема формирования Бесселева пучка изображена на рис. 1. На расстоянии 3 м от аксикона (А) расположено сферическое зеркало ( $L_1$ ) с фокусным расстоянием  $F_1 = 8,5$  м, которое в своей фокальной плоскости (П) формирует распределение в виде окружности, соответству-

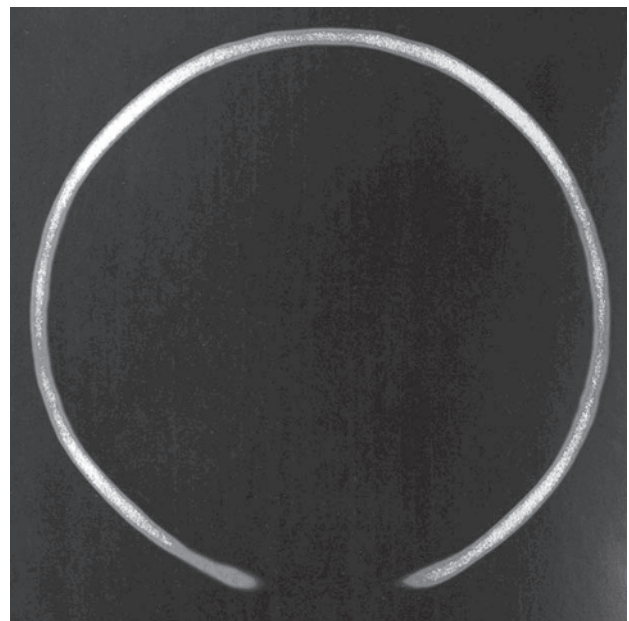
ющее дальней зоне излучения от конического волнового фронта, отраженного от аксикона (А). Диаметр окружности  $d_0$  равен  $2\alpha F_1$ , где  $\alpha = 5$  мрад – угол наклона волнового вектора к оптической оси при освещении аксикона коллимированным осевым пучком. Второе зеркало ( $L_2$ ) расположено на расстоянии 18 м от 1-го зеркала и имеет фокусное расстояние  $F_2 = 1,5$  м. Оно формирует перетяжку Бесселева пучка на участке  $L_1L_2$  вблизи своего фокуса. Таким образом, преобразующая схема из 2-х сферических зеркал формирует область концентрации излучения Бесселева пучка на удалении более 20 м от самого аксикона. Углы падения на все оптические элементы не превышали 0,05 рад. При таких углах влиянием астигматизма аксикона [9] и зеркал можно пренебречь. Как видно из рис. 1, при использовании выпуклого аксикона внутри схемы отсутствует перетяжка пучка.

В качестве источника излучения использовался импульсный ЭИ  $\text{CO}_2$ -лазер с объемом активной среды 10 л. Излучение лазера формировалось неустойчивым телескопическим резонатором с геометрическим увеличением  $M = 3,67$ , при этом выходное зеркало имело квадратное сечение с размером  $24 \times 24$  мм. Разрядная камера изолируется от атмосферы с помощью окон из КСl, установленных под углом Брюстера. Для обеспечения высоких пиковых мощностей нами использовались активные смеси, не содержащие He, с соотношением молекулярных газов  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:1$ . При удельном электрическом вкладе в разряд  $W = 200$  Дж/л пиковые мощности выходного излучения составляли 200 МВт при полной энергии импульса излучения 100 Дж.

Для экспериментов по формированию плазменных каналов был выбран зеркальный вариант рассеивающего аксикона диаметром 150 мм с углом отклонения осевого пучка 5 мрад. То есть поверхность аксикона является выпуклой, при этом его вершина выступает относительно края на 0,2 мм. Аксикон был изготовлен из стекла К8 по технологии ручной обработки с последующим нанесением покрытия из Al. Полировка стеклянной поверхности производилась по такой же технологии, как и при обработке оптических деталей для видимой области спектра. Следует отметить, что из-за рамочного сечения лазерного пучка не предъявлялось никаких требований к качеству обработки вершины конуса в пределах 10 мм светового диаметра от вершины. Как показали измерения профиля поверхности аксикона на измерительной машине “Мистраль”, остаточные отклонения оптической поверхности от заданного профиля не превышали 2 мкм. Аксикон освещался пучком лазера с радиусом кривизны не менее 100 м.



**Рис. 1.** Эквивалентная оптическая схема формирования Бесселева пучка на участке  $L_1L_2$  оптической оси. А – зеркальный аксикон с углом отклонения  $\alpha$ ,  $L_1$  и  $L_2$  – сферические зеркала, П – плоскость наблюдения дальней зоны аксикона.



**Рис. 2.** Отпечаток импульса излучения, отраженного от аксикона в фокусе сферического зеркала (распределение в “дальней зоне” аксикона).

Были проведены предварительные эксперименты по проверке оптического качества изготовленного аксикона на длине волны излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. На рис. 2 показан отпечаток распределения излучения в фокальной плоскости зеркала  $L_1$  (“дальняя зона” аксикона), полученный на предварительно засвеченной и проявленной фотобумаге. Диаметр кольца и его толщина хорошо совпадают с расчетными значениями для аксикона идеального качества и идеального пучка лазера. Азимутальная неоднородность освещения качественно соответствует расчетам при учете поперечного профиля лазерного пучка, имеющего квадратное сечение, и тени от крепежного элемента выходного зеркала резонатора.

### Экспериментальные результаты по формированию сплошных плазменных каналов

Перед проведением экспериментов были выполнены расчеты осевых распределений Бесселева пучка для параметров схемы, изображенной на рис. 1. Исходный лазерный пучок моделировался прямоугольным профилем в поперечном сечении в пределах квадратной рамки с внешним размером 80×80 мм и внутренним 30×30 мм. Отметим, что указанные размеры отличаются от геометрических границ пучка на выходе из резонатора из-за краевой дифракции и соответствуют эффективным размерам пучка, наблюдаемым экспериментально в плоскости аксикона.

Расчетное распределение интенсивности вдоль оси Бесселева пучка при полной мощности излучения в пучке 200 МВт изображено на рис. 3. Как видно из рисунка, превышение интенсивности излучения над порогом оптического пробоя воздуха (см. ниже) происходит на участке вдоль оси фокального распределения длиной 24 см. При этом максимальные интенсивности излучения достигают уровня  $6 \times 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. Несмотря на то, что геометрические оценки длины перетяжки  $L_1 = 1,39$  м и  $L_2 = 1,56$  м для пучков квадратного сечения, очевидно, носят лишь приблизительный характер, тем не менее они служат хорошей оценкой длины плазменного канала даже в этом случае.

Были проведены дополнительные эксперименты по проверке правильности расчетов фокальных распределений путем прямого измерения энергии лазерного импульса в пределах 1-го темного кольца перетяжки Бесселева пучка в отсутствие пробоя. Отпечаток излучения в перетяжке на фотобумаге приведен на рис. 4. В экспериментах измерялась доля энергии пучка, сосредоточенная в керне распределения. Как показала обработка этих измерений, экспериментальные значения интенсивности излучения на оси составляют 75% от расчетных.

Известно, что формирование плазменных каналов в атмосфере зависит от пороговых значений интенсивности образования пробоя воздуха. С целью определения пороговой интенсивности проведены эксперименты, в которых контролировалась длина плазменного канала при изменении полной мощности излучения. Интенсивности излучения вычислялись по описанной выше процедуре.

С использованием этой методики получено, что значение пороговой интенсивности излучения импульсного CO<sub>2</sub>-лазера  $I_{\text{пор}} = 8 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> для условий формирования оптического пробоя с помощью аксикона.

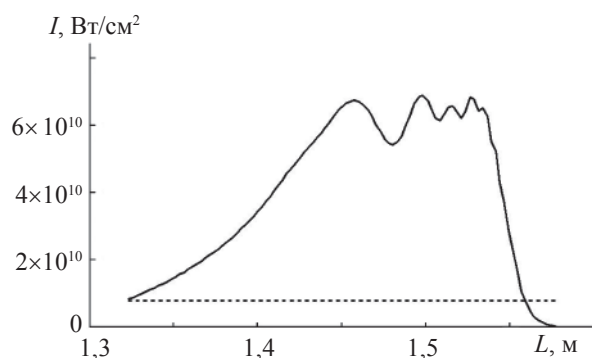


Рис. 3. Расчетное распределение интенсивности на оси Бесселева пучка при полной импульсной мощности 200 МВт в пучке в виде квадратной рамки. Пунктиром указан порог возникновения пробоя воздуха.

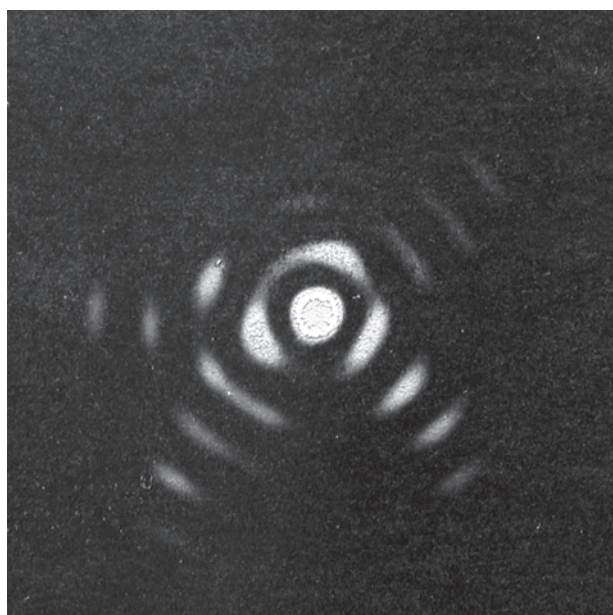


Рис. 4. Фотография распределения излучения в поперечном сечении формируемой аксиконом перетяжки. Диаметр первого темного кольца распределения составляет 0,85 мм.



Рис. 5. Фотография протяженной искры.

Фотография плазменного канала, формируемого в лабораторной атмосфере, приведена на рис. 5. Максимальная длина канала оказалась близкой к теоретической и составила 22 см при полной мощности излучения в переднем пике 150 МВт.

## Заключение

Предложенная оптическая схема позволяет формировать Бесселевы пучки с большим диапазоном изменения параметров при использовании одного конического элемента. Аналитическая модель позволяет простыми методами рассчитывать параметры фокального распределения излучения, создаваемого ФОС с аксиконами. Экспериментальная проверка показала совпадение длины формируемого плазменного канала с расчетными значениями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов М.Ф., Громовенко В.М., Лапшин В.А., Резунков Ю.А., Савельева В.П., Степанов В.В. Длинная лазерная искра для управления траекторией атмосферного электрического разряда // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 3. С. 40–47.
2. Бахари А., Таранухин В.Д. Лазерное ускорение электронов в вакууме до энергий  $\sim 10^9$  эВ // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 2. С. 129–134.
3. Apollonov V.V., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Polyakov D.M., Safulin A.V., Vasilyak L.M. Continuous long laser spark produced with conical mirror and CO<sub>2</sub> laser // Proc. SPIE. 2003. V. 5120. P. 631–639.
4. Пятницкий Л.Н. Неоднородности лазерной искры в пучках с компенсацией дифракционной расходимости // Прикладная физика. 2003. № 1. С. 55–64.
5. Ageichik A.A., Alekseev V.N., Gromovenko V.M., Koroljev V.I., Malinin A.N., Rezunkov Yu.A., Savelieva V.P., Sokolova G.A., Stepanov V.V., Baranov A.G., Kuchinsky A.A., Tomashevich P.V. Creation of the terawatt picosecond CO<sub>2</sub> laser // Program of the Conference on Laser Optics. St.-Petersburg, June 26–30, 2006.
6. Савельева В.П. Оптические формирующие системы для генерации длинной лазерной искры // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 3. С. 54–57.
7. Джеррард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику / Пер. с англ. под ред. Коробкина В.В. М.: Мир, 1978. 341 с.
8. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 263 с.
9. Thaning A, Jaroszewicz Z., Friberg A.T. Diffractive axicons in oblique illumination: analysis and experiments and comparison with elliptical axicons // Appl. Opt. 2003. V. 42. № 1. P. 9–17.