

УДК 535.42

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАУССОВСКОГО, ЛАГЕРР-ГАУССОВСКОГО И СУПЕР-ГАУССОВСКОГО ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ СВЕТОВОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ ПОГЛОЩАЮЩЕГО АКСИКОНА

А.Е. МАРТИРОСЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 17 августа 2010 г.)

Исследованы свойства нового оптического элемента – светового фильтра на основе поглощающего аксикона. Фильтр позволяет определять параметры радиально-симметричных лазерных пучков, создавать строго-коллимированные пучки, плавно перестраивать мощность пучков. Рассмотрено преобразование в фильтре гауссовского, лагерр-гауссовского и супер-гауссовского пучков. В результате этого преобразования создаются бубликообразные и М-образные профили пучков.

1. Введение

Измерение параметров и преобразование профиля лазерного пучка широко применяются в экспериментальных и прикладных задачах в областях оптики, фотоники, лазерной техники и т.д. Для измерения радиуса или расходимости пучков часто обрабатывают изображения поперечного сечения [1]. Однако из-за нелинейной чувствительности детектируемых приборов точность полученных результатов может быть неопределенной. Для определения центра лазерного пучка в последние годы используются сегментированные детекторы (segmented position sensing detectors) [2]. Однако эти детекторы имеют свои недостатки: “мертвая” область между сегментами, где не производится детектирование светового сигнала; степень согласованного отклика от секций составляет несколько процентов; нецелесообразность использования при ультракоротких лазерных импульсах, т.к. время нарастания и убывания электрических детектированных импульсов составляет более 10 нс; оптимальная работа только при определенных длинах волн света. Что касается преобразования пучков [3,4], то бубликообразные пучки используются для локализации и перемещения атомов и микроскопических частиц [5,6].

В данной работе рассмотрены уникальные свойства световых фильтров на основе поглощающего аксикона. Получено экспериментальное подтверждение возможности применения поглощающих аксиконов для сглаживания и увеличения области квази-бесселевого пучка [7,8]. Эти аксиконы могут служить хорошей основой для создания фильтров с изменяющимся радиальным показа-

телом поглощения. В результате преобразования в световом фильтре можно создавать бубликообразные и М-образные профили пучков. Световой фильтр может применяться для определения таких параметров лазерного пучка, как местонахождение оси, радиуса пучка и расходимости. Ввиду того, что в последние годы создаются аксиконы [9,10] и инверсные аксиконы [11] с микрометрическими размерами, появляется реальная возможность преобразования и измерения лазерных параметров с субмикрометрической точностью.

2. Фильтр на основе поглощающего аксикона

Рассмотрим распространение радиально-симметричного пучка через световой фильтр на основе поглощающего аксикона AN и прозрачного элемента – “инверсного аксикона” IA (рис.1). Согласно [12,13], если ось пучка совпадает с осью фильтра, то мощность отфильтрованного пучка минимальна. Это свойство фильтра может быть применено для определения местоположения оси, радиуса и расходимости (сходимости) радиально-симметричного лазерного излучения, а также для образования строго-коллимированных пучков.

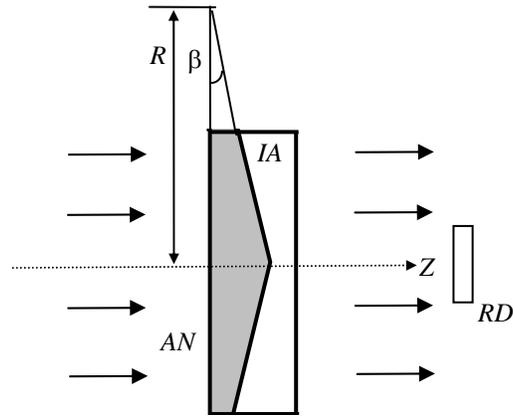


Рис.1. Преобразование радиально-симметричного пучка в фильтре, основанном на поглощающем аксиконе. Заполненная зона соответствует поглощающему аксикону AN , который контактирует через коническую поверхность с прозрачным оптическим элементом IA с тем же коэффициентом преломления и с плоской поверхностью, параллельной плоской поверхности аксикона. Стрелки на левой стороне соответствуют падающему пучку, а на правой – отфильтрованному излучению. RD – регистрирующее устройство, Z – ось фильтра.

Радиальный профиль пропускания света $g(r)$ в фильтре соответствует преобразованию в поглощающем аксиконе [7,8]:

$$g(r) = (1 - D)^2 \exp[-k \tan \beta (R - r)], \quad (1)$$

где D – коэффициент отражения света у плоских поверхностей фильтра, k – коэффициент поглощения, R – радиус и β – угол у основания аксикона.

3. Прохождение гауссовского пучка через фильтр

Рассмотрим случай, когда распределение интенсивности падающего излучения имеет гауссовский профиль [12]:

$$P_0(r) = (2F_0/\pi w^2) \exp(-2r^2/w^2), \quad (2)$$

где w – радиус, а F_0 – мощность падающего пучка. С учетом (1) профиль гауссовского пучка после преобразования в фильтре описывается следующей формулой:

$$P(y, a) = (1 - D)^2 (2F_0/\pi w^2) \exp(-Y) \exp(-2y^2/a^2 + y), \quad (3)$$

где $a = kw \tan \beta$ – нормированный радиус лазерного пучка, $Y = kR \tan \beta$ – нормированный радиус фильтра, $y = kr \tan \beta$ – нормированная радиальная координата. На рис.2 представлены профили интенсивности отфильтрованного излучения при $a = 0$ (пунктирная линия), $a = 2.5$ (сплошная линия) и $a = 5$ (жирная сплошная линия).

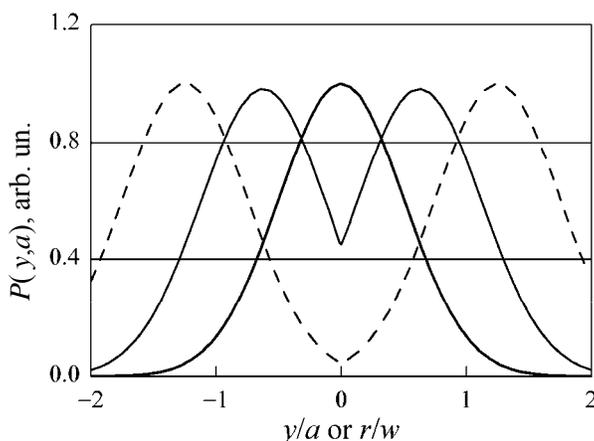


Рис.2. Профиль интенсивности отфильтрованного гауссовского пучка при $a = 0$ (жирная сплошная линия), $a = 2.5$ (сплошная линия), $a = 5$ (пунктирная линия). Диаметры пучков на полувысоте максимальной интенсивности составляют: $1.18w$ при $a = 0$, $2.40w$ при $a = 2.5$, $3.68w$ при $a = 5$.

Мощность прошедшего через фильтр пучка на кольце с радиусом r , шириной dr и поверхностью $2\pi r dr$ описывается формулой

$$dF(y, a) = 4F_0(1 - D)^2 \exp(-Y) (y/a^2) \exp(-2y^2/a^2 + y) dy, \quad (4)$$

где $dy = kdr \tan \beta$ – нормированная ширина кольца. Уравнение (4) может быть переписано в интегральной форме:

$$\frac{F(a)}{F_0} = (1 - D)^2 \exp(-Y) \frac{4}{a^2} \int_0^y y \exp\left(-\frac{2y^2}{a^2} + y\right) dy. \quad (5)$$

Уравнение (5) решается численно. Сплошная линия на рис.3 иллюстрирует изменение отфильтрованной мощности от a при $D \rightarrow 0$ и $Y = 2a$ ($R = 2w$).

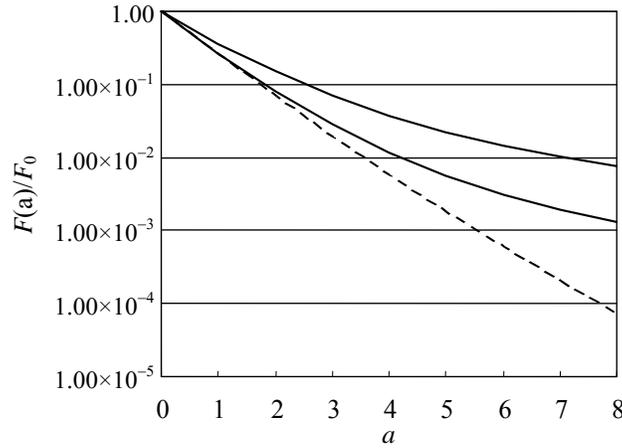


Рис.3. Отношение отфильтрованной мощности к начальной мощности излучения $F(a)/F_0$ от a при $D \rightarrow 0$ и $Y = 2a$ ($R = 2w$) в случае падающего гауссовского излучения (сплошная линия), лаггерр-гауссовского излучения с нулевой радиальной модой и с $n=1$ (жирная сплошная линия), супер-гауссовского излучения с $p = 4$ (пунктирная линия).

В случае радиального перемещения оси фильтра на нормированное расстояние ma относительно оси падающего излучения, отфильтрованная мощность определяется из следующего выражения:

$$\frac{F(a,m)}{F_0} = (1-D)^2 \exp(-Y) \frac{2}{\pi a^2} \int_0^Y \int_0^{2\pi} y \exp\left(-\frac{2y^2}{a^2} + \sqrt{y^2 + m^2 a^2} - 2yma \cos \alpha\right) dy d\alpha, \quad (6)$$

где $\sqrt{y^2 + m^2 a^2} - 2yma \cos \alpha$ – расстояние от перемещенной оси фильтра до рассматриваемой точки, α – азимутальный угол, образованный направлениями y и радиального перемещения оси фильтра. Рис.4 показывает степень увеличения отфильтрованной мощности (в процентах) в зависимости от увеличения a в результате сдвига фильтра на нормированное расстояние $0.05a$. Интересно отметить, что по этому показателю распределения гауссовского пучка, лаггерр-гауссовского излучения с нулевой радиальной модой и с $n=1$, а также супер-гауссовского излучения с $p = 4$, практически совпадают. По сути дела, данный показатель определяет точность определения оси радиально-симметричного лазерного пучка с помощью фильтра на основе поглощающего аксикона. Подчеркнем, что нормированный сдвиг $0.05a$ оси фильтра представлен для примера, а возможности методики позволяют определять сдвиги порядка $\sim 0.001a$ (при больших значениях a). Отметим также, что поглощающий аксикон или фильтр на основе поглощающего аксикона обладает уникальной способностью определять центр также радиально несимметричных пучков [14].

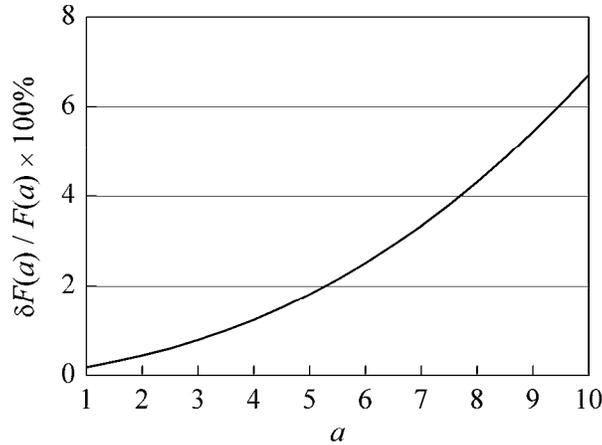


Рис.4. Зависимость увеличения (в процентах) отфильтрованной мощности $[F(a, m) - F(a)]/F(a) = \delta F(a)/F(a)$ от увеличения a в результате сдвига фильтра на нормированное расстояние $0.05a$.

Учитывая, что $F_f = F_0(1 - D)^2 \exp(-Y)$ есть мощность сфокусированного на фильтре пучка, прошедшего через его ось, уравнение (5) принимает вид

$$\frac{F(a)}{F_f} = \frac{4}{a^2} \int_0^Y y \exp\left(-\frac{2y^2}{a^2} + y\right) dy. \quad (7)$$

Уравнение (7) также решается численно. Если $a \uparrow Y$ ($w \uparrow R$), то при относительно больших a зависимость $F(a)/F_f$ от a сильно нелинейна, что позволяет точно определять радиус и расходимость лазерного пучка. В этом случае, в интервале $2 < a < 8$ распределение $F(a)/F_f$ можно аппроксимировать функцией $F(a)/F_f \approx (1.8/a^{2.1}) \exp(a^{1.27})$. Зависимость относительной погрешности $\delta a/a$ от a (если отношение $F(a)/F_f$ измерено с неопределенностью 1%) оценивается 2.81% при $a = 0.5$; 1.28% при $a = 1$; 0.53% при $a = 2$; 0.19% при $a = 4$; 0.09% при $a = 6$. Что касается погрешности определения радиуса $w = a/(k \tan \beta)$, то относительная погрешность определения коэффициента поглощения k может составлять $\sim 0.1\%$ и даже меньше [15], а погрешностью измерения угла β можно пренебречь, т.к. современные методы позволяют измерять углы с точностью $\sim 0.2''$ [16].

4. Прохождение через фильтр лаггер-гауссовского пучка с нулевой радиальной модой

Распределение интенсивности лаггер-гауссовского пучка с нулевой радиальной модой представляется следующим выражением [17]:

$$P_0(r, n) = (2F_0/\pi w^2) (\sqrt{2}r/w)^{2n} \exp(-2r^2/w^2), \quad (8)$$

где F_0 – мощность падающего пучка, n – азимутальная мода. После прохождения через фильтр профиль пучка преобразовывается:

$$P(y, a, n) = (1 - D)^2 \exp(-Y) (2F_0 / \pi w^2) (\sqrt{2}y/a)^{2n} \exp(-2y^2/a^2 + y). \quad (9)$$

На рис.5 представлен профиль интенсивности отфильтрованного лаггерр-гауссовского пучка с $n=1$ при $a=0$ (жирная сплошная линия), при $a=2.5$ (сплошная линия) и при $a=5$ (пунктирная линия). Мощность лаггерр-гауссовского пучка, прошедшего через фильтр, выражается в виде

$$\frac{F(a, n)}{F_0} = (1 - D)^2 \exp(-Y) \frac{4 \times 2^n}{a^{2(n+1)}} \int_0^Y y^{2n+1} \exp\left(-\frac{2y^2}{a^2} + y\right) dy, \quad (10)$$

или

$$\frac{F(a, n)}{F_f} = \frac{4 \times 2^n}{a^{2(n+1)}} \int_0^Y y^{2n+1} \exp\left(-\frac{2y^2}{a^2} + y\right) dy. \quad (11)$$

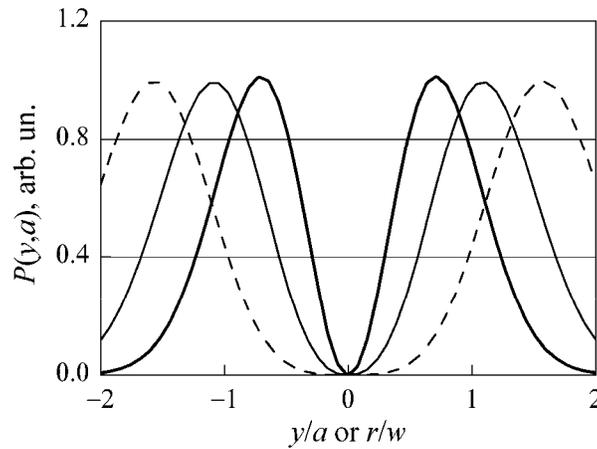


Рис.5. Профиль интенсивности отфильтрованного лаггерр-гауссовского пучка с $n=1$ при $a=0$ (жирная сплошная линия), $a=2.5$ (сплошная линия), $a=5$ (пунктирная линия). Диаметры пучков на полувысоте максимальной интенсивности составляют $2.32w$ при $a=0$; $3.22w$ при $a=2.5$; $4.20w$ при $a=5$.

Изменение $F(a)/F_0$ от a при $D \rightarrow 0$ и $Y = 2a$ ($R = 2w$), в случае лаггерр-гауссовского распределения пучка с нулевой радиальной модой и с $n=1$, представлено на рис.3 жирной сплошной линией. Уравнение (11) также может быть представлено в приближенной форме при $a \uparrow Y$ ($w \uparrow R$) и $n=1$ в наиболее подходящем для измерений интервале $2 < a < 8$: $F(a, n)/F_f \approx (3.5/a^{1.95}) \times \exp(a^{1.315})$. Данные относительной погрешности $\delta a/a$ от a при измерении $F(a)/F_f$ с неопределенностью 1% ниже соответствующих показателей гауссовского пучка на 10–30%.

5. Прохождение супер-гауссовского пучка через фильтр

Распределение интенсивности супер-гауссовского пучка с коэффициентом p представляется в виде [3]:

$$P_0(r, p) = \left(2^{2/p} p F_0 / 2\pi w^2 \Gamma(2/p)\right) \exp\left[-2(r/w)^p\right], \quad (12)$$

где F_0 – мощность падающего излучения. Профиль интенсивности отфильтрованного пучка описывается функцией

$$P(y, a, p) = (1 - D)^2 \exp(-Y) \left(2^{2/p} p F_0 / 2\pi w^2 \Gamma(2/p)\right) \exp\left[-2(y/a)^p + y\right]. \quad (13)$$

Распределение интенсивности отфильтрованного супер-гауссовского пучка с $p = 4$ при $a = 0$ (жирная сплошная линия), $a = 2.5$ (сплошная линия), $a = 5$ (пунктирная линия) показано рис.6. Мощность отфильтрованного супер-гауссовского пучка может быть представлена в виде

$$\frac{F(a, p)}{F_0} = (1 - D)^2 \exp(-Y) \frac{2^{2/p} p}{a^2 \Gamma(2/p)} \int_0^y \exp\left[-2(y/a)^p + y\right] dy, \quad (14)$$

или

$$\frac{F(a, p)}{F_f} = \frac{2^{2/p} p}{a^2 \Gamma(2/p)} \int_0^y \exp\left[-2(y/a)^p + y\right] dy. \quad (15)$$

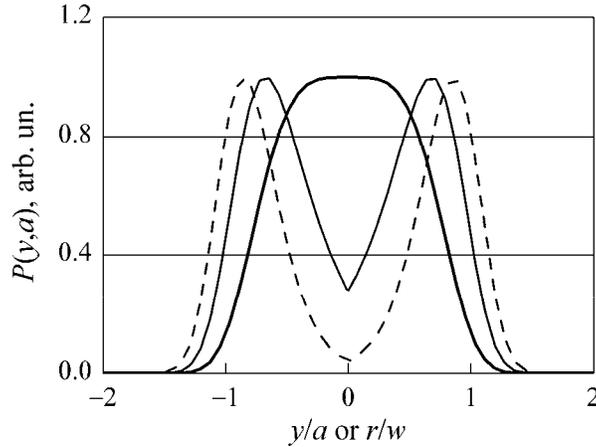


Рис.6. Профиль интенсивности отфильтрованного супер-гауссовского пучка с $p = 4$ при $a = 0$ (жирная сплошная линия), $a = 2.5$ (сплошная линия), $a = 5$ (пунктирная линия). Диаметры пучков на полувывоте максимальной интенсивности составляют $1.54w$ при $a = 0$; $1.96w$ при $a = 2.5$; $2.22w$ при $a = 5$.

Пунктирной линией на рис.3 представлено отношение отфильтрованной мощности к начальной мощности излучения $F(a)/F_0$ от a при $D \rightarrow 0$ и $Y = 2a$ ($R = 2w$) в случае, когда через фильтр проходит супер-гауссовский пучок с $p = 4$. Зависимость $F(a)/F_f$ от a при $a \uparrow Y$ ($w \uparrow R$) и $p = 4$ может быть аппроксимирована функцией $F(a)/F_f \approx (2/a^{1.8}) \exp(a^{1.085})$ (в интервале $2 < a < 8$). При измерении отношения $F(a)/F_f$ с точностью 1% зависимость относительной погрешности $\delta a/a$ от a равна: 3.22% при $a = 0.5$; 1.59% при $a = 1$; 0.71% при $a = 2$; 0.33% при $a = 4$; 0.18% при $a = 6$.

6. Эксперимент

В эксперименте были измерены параметры гелий-неонового ($\lambda = 633$ нм) лазерного пучка. Световой фильтр закреплялся на столике, обеспечивающем микрометрические перемещения в горизонтальном и вертикальном направлениях. В качестве детектора использовался измеритель мощности излучения ИМО-2Н. В случае, когда интенсивность прошедшего через фильтр лазерного пучка минимальна, ось пучка совпадала с осью фильтра. Были определены радиусы лазерного излучения в двух местах распространения пучка на расстоянии

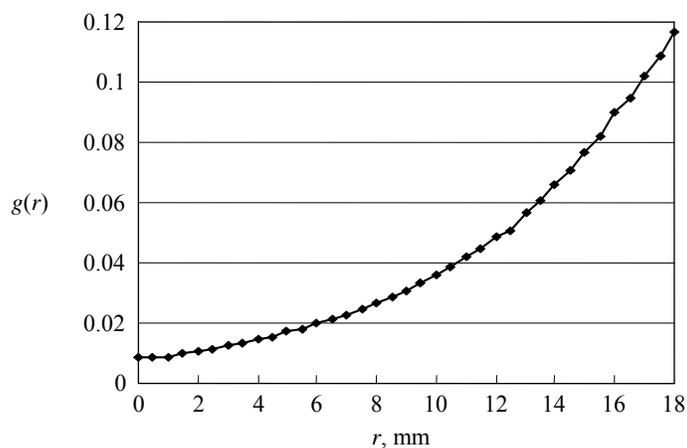


Рис.7. Зависимость пропускания сфокусированного пучка $g(r)$, прошедшего через фильтр с параметрами $k = 1.15$ мм⁻¹, $R = 32$ мм, $\beta = 7.5^\circ$, от радиальной координаты r .

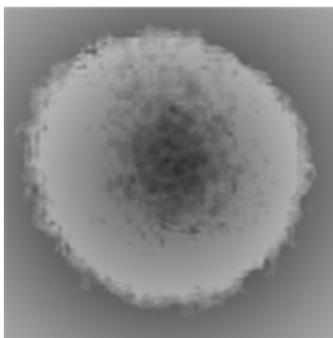


Рис.8. Изображение профиля отфильтрованного пучка при $a = 2.5$.

1 м друг от друга: $w_1 = 10.794$ мм и $w_2 = 11.859$ мм. Угол расходимости гелий-неонового лазерного пучка составлял 1.77 ± 0.08 мрад. На рис.7 показана зависимость пропускания $g(r)$ сфокусированного пучка, прошедшего через фильтр с параметрами $k = 1.15$ мм⁻¹, $R = 32$ мм, $\beta = 7.5^\circ$, от радиальной координаты r . Изображение профиля отфильтрованного пучка представлено на рис.8.

7. Заключение

Таким образом, фильтр на основе поглощающего аксикона позволяет определять ось радиально-симметричных лазерных пучков, создавать строго-коллимированные пучки, осуществлять радиальное перераспределение лазерного профиля интенсивности, создавать бубликообразные и М-образные пучки, плавно перестраивать мощность пучка, измерять радиус и расходимость пучка. Среди рассмотренных радиально-симметричных пучков профиль интенсивности лаггер-гауссовского пучка обладает наибольшим перераспределением в периферийную область относительно оси фильтра. Это позволяет определять параметры этого пучка с наибольшей точностью. По этому признаку вслед за лаггер-гауссовским пучком следуют гауссовский и супер-гауссовский пучки.

Автор благодарен МНТЦ за поддержку работы (грант № А-1517).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Г.Хирд**. Измерение лазерных параметров. М., Мир, 1970.
2. http://www.osioptoelectronics.no/Cd-Content/standard-products/AE9470_PSD_Quadrant_Position_Detector.pdf.
3. **C.Liu, S.Zhang**. Design and diffractive modeling on a single lens shaper. Proc. PAC09, Vancouver, Canada, 2009:TU6RFP046.
4. **O.Boyko, Th.A.Planchon, P.Mercere, et al**. Opt. Comm., **246**, 131 (2005).
5. **T.Kuga, Y.Toni, N.Shiokawa, et al**. Phys. Rev. Lett., **78**, 4713 (1997).
6. **H.He, M.E.J.Friese, et al**. Phys. Rev. Lett., **75**, 826 (1995).
7. **А.Е.Мартirosян**. Изв. НАН Армении, Физика, **44**, 426 (2009).
8. **А.Е.Мартirosян**. Optics and Lasers Tech., **42**, (328) 2010.
9. **R.Grunwald, U.Griebner, F.T.Schirschwitz, et al**. Opt. Lett., **25**, 981 (2000).
10. **K.M.Tan, M.Mazilu, T.H.Chow, et al**. Opt. Express, **17**, 2375 (2009).
11. **G.M.Philip, N.K.Viswanathan**. Proc. Inter. Conf. on Optics and Photonics, Chandigarh, India, CS10:2009.
12. **А.Е.Мартirosян**. Optics and Lasers Tech., **43**, 242 (2011).
13. **А.Е.Мартirosян**. Промышленная собственность, патент РА № 2467А, 2010.
14. **А.Е.Мартirosян**. Тезисы докл. конф. «Лазерная Физика-2009», Ашгарак, с.159.
15. **Z.M.Zhang, T.R.Gentile, A.L.Migdall, R.U.Datla**. Appl. Optics, **34**, 8889 (1997).
16. **G.X.Zhang, C.H.Wang, Z.Li**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, **43**, 457 (1994).
17. **A.S.Kennedy, M.J.Szabo, H.Teslow, et al**. Phys. Rev. A, **66**, 043801 (2002).

TRANSFORMATION AND PARAMETERS MEASUREMENT OF GAUSSIAN, LAGUERRE-GAUSSIAN AND SUPER-GAUSSIAN BEAMS BY USING A LIGHT FILTER BASED ON ABSORBING AXICON

A.E. MARTIROSYAN

The properties of a new optical element – light filter based on absorbing axicon, are studied. The filter allows to measure parameters of laser beams with a radial symmetry, to form precisely collimated beams, to fluent tune the power of laser radiation. The transformation of Gaussian, Laguerre-Gaussian and super-Gaussian beams in the filter is considered. As a result of such transformation, doughnut-like and M-like beams are formed.