

## ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

### О ПРОХОЖДЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ОГРАНИЧЕННЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ СФОКУСИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ ЧЕРЕЗ ТОНКУЮ МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПЛЁНКУ

*Казанский Н.Л., Харитонов С.И.*

*Институт систем обработки изображений РАН,*

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)*

#### **Аннотация**

Рассмотрено поведение пространственно-ограниченных широкополосных импульсов с радиальной поляризацией при распространении в однородном пространстве и при прохождении тонких металлических плёнок. Показано, что форма распределения поля на выходе из плёнки не связана с появлением плазмон-поляритонной волны, а повторяет распределение поля на входе металлической плёнки.

Ключевые слова: уравнения Максвелла, дифракция, широкополосный импульс.

#### **Введение**

В связи с широким применением при изготовлении дифракционных оптических элементов (ДОЭ) роторных станков [1-3] и станций лазерной записи с круговым сканированием [4-6] большое значение приобрело решение задач дифракции на радиально-симметричных структурах [7-9]. Это связано с тем, что, наряду с дифракционными линзами [10-11], корректорами аберраций [12-13] и дифракционными компенсаторами [14-15], широкое распространение получили радиально-симметричные ДОЭ, фокусирующие когерентное электромагнитное излучение в отрезок, лежащий на оптической оси [16-17], в кольцо [18-20], набор концентрических колец [21] и т.п. [22-24].

Дифракционные оптические элементы такого типа актуальны для использования в лазерных проигрывателях компакт-дисков [25], для получения оптического разряда в газе [26], лазерных технологических установках [27-28], для ввода излучения в оптическое волокно [29], создания опорной световой линии в метрологии [30], выращивания монокристаллического волокна [31], трёхмерного контроля дистанционирующих решёток тепловыделяющих сборок атомных реакторов [21, 32] и т.п.

Расчёту поля от радиально-симметричных ДОЭ в рамках скалярной оптики посвящены работы [7-10, 19, 20, 22-24]. Имеется также ряд работ, посвящённых исследованию фокусировки в кольцо на основе ДОЭ с фазовыми функциями, полученными различными методами [7-19, 20, 26, 27].

Расчёту дифракции электромагнитных волн на металлических плёнках и полосках посвящены работы [33-35].

В работе [33] получено решение задачи дифракции электромагнитных волн на системе полубесконечных и идентичных эквидистантно расположенных экранов.

В работе [34] получено решение парных интегральных уравнений задачи дифракции на прямоугольной металлической полоске (на отверстии в эк-

ране) в пространственно-временном представлении; показано, что в основе решения лежит метод Галеркина, в котором базисные функции построены на всей поверхности сложной области и, кроме того, они удовлетворяют условию на металлическом ребре.

В работе [35] введены функции, являющиеся решениями волнового уравнения в цилиндрической системе координат. Показано, что эти функции использованы при решении методом разделения переменных во временной области краевой задачи о дифракции сверхкоротких электромагнитных импульсов на двумерных металлических телах с замкнутым контуром поперечного сечения.

Однако эти работы имеют недостатки. Работы [33, 34] ориентированы на исследование краевых эффектов, возникающих при дифракции плоской волны на полубесконечной плоскости. В результате использование этих методов для решения задачи дифракции сфокусированной волны на слоистой структуре является проблематичным. Методы и алгоритмы, приведённые в работе [35], являются общими, и применение их для частной задачи, рассмотренной в представленной работе, также приведёт к росту вычислительной сложности.

В данной работе рассмотрено поведение пространственно-ограниченных широкополосных импульсов с радиальной поляризацией при распространении в однородном пространстве и при прохождении тонких металлических плёнок. Моделирование распространения импульсов через оптическую систему вызывает в настоящее время большой интерес [36-39]. Поведение импульсов света описывается уравнениями Максвелла [40]. При прохождении металлической плёнки возникает усиление поля на её обратной стороне. Это усиление связано с возбуждением поверхностных плазмонов на границе металлической плёнки [41-46]. Ниже показано, что форма распределения поля на выходе плёнки не связана с появлением плазмон-поляритонной волны, а определяется распределением поля на входе металлической плёнки.

Для моделирования распространения когерентного излучения не был использован метод FDTD [47]. Несмотря на универсальность, метод FDTD обладает значительной вычислительной сложностью [47-49]. Рассмотренный в работе метод расчёта дифракции позволил получить результат без использования суперкомпьютера.

**1. Распространение волн с определённым орбитальным моментом в радиально-симметричной среде**

Для решения поставленной задачи запишем уравнения Максвелла не во временной, а в частотной области [50-51], т.е. будем использовать систему уравнений Максвелла для комплексных амплитуд. Для полного описания решения необходимо 6 компонент: три компоненты электрического поля и три компоненты магнитного поля. Для однозначного описания достаточно записать уравнения для поперечных компонент поля. Продольные компоненты электромагнитного поля можно получить, подставив поперечные компоненты в уравнения Максвелла. Исходя из условия задачи, будем использовать цилиндрические координаты [52-53]. Для дальнейших выкладок представим уравнения Максвелла в эволюционном виде. В цилиндрической системе координат система уравнений Максвелла для комплексных амплитуд в эволюционном виде записывается следующим образом:

$$\frac{i}{k} \frac{\partial |W\rangle}{\partial z} = H |W\rangle, \tag{1}$$

$$|W\rangle = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ H_1 \\ H_2 \end{pmatrix}, \quad k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}. \tag{2}$$

Компоненты с индексом 1 – это радиальные компоненты электромагнитного поля, компоненты с индексом 2 – азимутальные;  $\omega$  – циклическая частота света,  $\lambda$  – длина волны в пустоте,  $c$  – скорость света в пустоте. Оператор Гамильтона-Максвелла представляется в виде

$$H = \begin{pmatrix} 0 & A \\ B & 0 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

где  $A = \frac{i}{k} \begin{pmatrix} -\frac{i}{k} D \epsilon^{-1} D_2; & \frac{i}{k} D \epsilon^{-1} D_1 + ik; \\ -\frac{i}{k} \epsilon^{-1} D_2 D_2 - ik; & \frac{i}{k} \epsilon^{-1} D_2 D_1; \end{pmatrix}, \tag{4}$

$$B = \frac{i}{k} \begin{pmatrix} \frac{i}{k} D D_2; & -\frac{i}{k} D D_1 - ik \epsilon; \\ \frac{i}{k} D_2 D_2 + ik \epsilon; & -\frac{i}{k} D_2 D_1; \end{pmatrix}, \tag{5}$$

а дифференциальные операторы имеют вид

$$D_1 = (r)^{-1} \frac{\partial(r)}{\partial r} = (r)^{-1} + D, \tag{6}$$

$$D_2 = (r)^{-1} \frac{\partial}{\partial \phi}, \tag{7}$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $(r, \phi)$  – цилиндрические координаты. Следует отметить, что в пространстве состояний с определённым орбитальным моментом действие оператора  $D_2 = im(r)^{-1}$ , где  $m$  – число, определяющее орбитальный момент.

Существуют 4 типа линейно независимых решений системы уравнений Максвелла в цилиндрических координатах. Все они могут быть сведены в матрицу

$$|F_{\alpha m}\rangle = \begin{pmatrix} \gamma e_{\alpha m1} & -e_{\alpha m2} & -\gamma e_{\alpha m1} & -e_{\alpha m2} \\ \epsilon_1 e_{\alpha m2} & \gamma e_{\alpha m1} & \epsilon_1 e_{\alpha m2} & \gamma e_{\alpha m1} \end{pmatrix}, \tag{8}$$

$$e_{\alpha m1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial(kr)} J_m(k\beta r) \\ \frac{im}{(kr)} J_m(k\alpha r) \end{pmatrix}, \quad e_{\alpha m2} = \begin{pmatrix} -\frac{im}{(kr)} J_m(k\beta r) \\ \frac{\partial}{\partial(kr)} J_m(k\alpha r) \end{pmatrix}, \tag{9}$$

где  $\alpha$  – конический параметр,  $J_m(x)$  – цилиндрическая функция Бесселя.

Первый столбец описывает волну поперечно-магнитного типа, которая распространяется в положительном направлении. Второй столбец описывает волну поперечно-электрического типа, распространяющуюся в положительном направлении. Остальные два столбца описывают волны, распространяющиеся в противоположном направлении.

1.1. Случай радиальной поляризации

Рассмотрим в качестве примера распространение радиально-поляризованной волны. Представление произвольной радиально-поляризованной волны в общем случае имеет вид

$$W(r, z) = \int_0^\infty S(\beta, k) \begin{pmatrix} \gamma_2(\beta) \\ \epsilon_2 \end{pmatrix} \times \tag{10}$$

$$\times J_1(k\beta r) \exp\left(ik\sqrt{\epsilon_2 - \beta^2}z\right) \beta d\beta,$$

$$W(r, z) = \begin{pmatrix} E_r \\ H_\phi \end{pmatrix},$$

где  $\epsilon_2 = n_2^2$  – диэлектрическая проницаемость среды, в которой распространяется электромагнитная волна,  $n_2$  – показатель преломления среды,

$$\gamma_2(\beta) = \sqrt{\epsilon_2 - \beta^2}.$$

Продольная компонента поля имеет вид

$$E_z(r, z) = i \int_0^\infty S(\beta, k) J_0(k\beta r) \exp\left(ik\sqrt{\epsilon_2 - \beta^2}z\right) \beta^2 d\beta.$$

Из полученного выражения следует, что весовая функция, определяющая вклад каждой цилиндрической волны, имеет вид

$$S(\beta, k) = k^2 \int_0^\infty \begin{pmatrix} \gamma_2^{-1}(\beta) \\ \epsilon_2^{-1} \end{pmatrix} \otimes W(r, \phi, 0) J_1(k\beta r) r dr, \tag{11}$$

где  $\otimes$  означает покомпонентное умножение двух матриц столбцов.

В случае, если распределение комплексной амплитуды поля в начальной плоскости имеет вид

$$E_0(r) = \frac{r}{\sigma} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (12)$$

где  $\sigma$  – параметр гауссового пучка, пространственно-частотная спектральная функция имеет вид

$$\gamma_2(\beta)S(\beta, k) = k^3\sigma^3\beta \exp\left(-\frac{k^2\beta^2\sigma^2}{2}\right). \quad (13)$$

Далее рассмотрим распространение сфокусированного пучка. Сфокусированный пучок может быть сформирован с помощью оптической системы как содержащей, так и не содержащей ДОЭ. Дисперсией показателя преломления пренебрежём. В этом случае распределение комплексной амплитуды сфокусированного пучка имеет вид:

$$E_0(r) = A(r) \exp\left(-ikn_2\sqrt{(r-r_0)^2 + f^2}\right), \quad (14)$$

где  $r_0$  – радиус радиально-симметричной каустики,  $f$  – расстояние до каутической линии.

Заменяя функцию Бесселя её асимптотическим выражением  $J_1(x) = \sqrt{2/(\pi x)} \sin(x - \pi/4)$  и используя метод стационарной фазы, получаем выражение для пространственно-частотной спектральной функции

$$S(\beta, k)\gamma_2(\beta) = kn_2 \sqrt{\frac{r_s f}{\beta(n_2^2 - \beta^2)^{3/2}}} \times \quad (15)$$

$$\times A(r_s) \exp\left[ik\left(-f\sqrt{n_2^2 - \beta^2} + \beta r_0\right)\right],$$

$$r_s = r_0 + \frac{f\beta}{\sqrt{(n_2^2 - \beta^2)}}. \quad (16)$$

Это выражение в дальнейшем будет использовано для расчёта дифракции широкополосного импульса.

1.2. Распространение широкополосного импульса с радиальной поляризацией в свободном пространстве

В предыдущем пункте было получено представление решения системы уравнений Максвелла для пучков с радиальной поляризацией, гармонически изменяющихся во времени. Для того чтобы найти решение системы уравнений Максвелла во временной области, необходимо умножить полученную комплексную амплитуду на  $\exp(-i\omega t)$  и проинтегрировать по частоте с некоторым весом  $F_t(k)$

$$W(r, z, t) = c \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} F_t(k) S(\beta, k) \begin{pmatrix} \gamma_2(\beta) \\ \epsilon_2 \end{pmatrix} \times \quad (17)$$

$$\times J_1(k\beta r) \exp\left(ik\sqrt{\epsilon_2 - \beta^2}z - ickt\right) \beta d\beta dk,$$

где  $S(\beta, k)$  зависит от пространственного распределения поля в плоскости  $z = 0$ , а  $F_t(\omega)$  зависит от спектрального состава пучка. Для пучков, имеющих

гауссову форму по времени, частотная функция  $F_t(\omega)$  имеет вид

$$F_t(k) = \frac{c\tau}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(k-k_0)^2\tau^2 c^2}{2}\right). \quad (18)$$

На практике особый интерес представляет прохождение импульсов с «чирпом» [38]. Импульсы с такой частотной характеристикой выходят из лазеров с компрессией, а частотная функция их пучков имеет следующий вид:

$$F_t(k) = \frac{c}{2\pi} \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tau^2} + i\alpha\right)t^2 - ick_0 t\right) \exp(ickt) dt. \quad (19)$$

**2. Прохождение через тонкую плёнку**

2.1. Прохождение сходящегося пучка с каустикой в виде кольца через тонкую плёнку

Пусть сфокусированный пучок из среды с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$  падает на металлическую плёнку с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_3$ . Среда после плёнки имеет диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_4$ . Будем считать, что сходящийся пучок сформирован с помощью оптической системы, не содержащей ДОЭ. Оптическая схема эксперимента изображена на рис. 1.

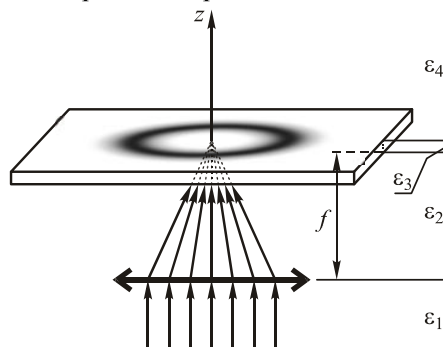


Рис. 1. Оптическая схема фокусировки пучка с радиальной поляризацией на тонкой металлической плёнке

Электромагнитное поле после прохождения металлической плёнки описывается выражением

$$W(r, z) = \int_0^{\infty} S(\beta, k) T_{TM}(\beta, k) \begin{pmatrix} \gamma_2(\beta) \\ \epsilon_2 \end{pmatrix} \times \quad (20)$$

$$\times J_1(k\beta r) \exp\left(ik\sqrt{\epsilon_4 - \beta^2}(z_1 - d)\right) \beta d\beta,$$

где  $S(\beta, k)$  имеет вид (15),  $z_1$  – расстояние от плёнки,  $d$  – толщина плёнки. В случае  $r_0=0$  выражение для  $S(\beta, k)$  принимает вид:

$$S(\beta, k)\gamma(\beta) = \frac{kfn_2}{(n_2^2 - \beta^2)} \times \quad (21)$$

$$\times A\left(\frac{F\beta}{\sqrt{n_2^2 - \beta^2}}\right) \exp\left[ik\left(-f\sqrt{n_2^2 - \beta^2}\right)\right].$$

Функция  $T_{TM}(\beta, k)$  описывает прохождение когерентного электромагнитного излучения через металлическую плёнку

$$T_{TM}(\beta, k) = T_{ij}(\beta) T_{js}(\beta) \exp(ik\gamma_j(\beta)d) \times \left(1 - R_{sj}(\beta) R_{ji}(\beta) \exp(2ik\gamma_j(\beta)d)\right)^{-1}, \quad (22)$$

где  $i = 2, j = 3, s = 4$ ,

$$T_{pq}^{TM}(\beta) = \frac{2}{\begin{pmatrix} \varepsilon_p & \gamma_q \\ \varepsilon_q & \gamma_p \end{pmatrix}}, \quad R_{pq}^{TM}(\beta) = \frac{\begin{pmatrix} \varepsilon_q & -\gamma_q \\ \varepsilon_p & -\gamma_p \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \varepsilon_q & \gamma_q \\ \varepsilon_p & \gamma_p \end{pmatrix}}, \quad (23)$$

$T_{pq}^{TM}(\beta)$  – коэффициент прохождения через границу с различными диэлектрическими проницаемостями,  $R_{pq}^{TM}(\beta)$  – коэффициент отражения от границы с различными диэлектрическими проницаемостями,  $\gamma_p = \sqrt{\varepsilon_p - \beta^2}$ .

Продольная компонента имеет вид

$$E_z(r, z) = i \int_0^\infty S(\beta, k) T_{TM}(\beta, k) \times J_0(k\beta r) \exp(ik\sqrt{\varepsilon_2 - \beta^2}z) \beta^2 d\beta. \quad (20a)$$

Из формулы (22) следует, что коэффициент пропускания имеет максимум при некотором значении  $\beta$ . Значения коэффициента пропускания приведены в табл. 1. Величину, при которой функция пропускания имеет максимальное значение, приблизительно можно вычислить по формуле

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_3 \varepsilon_4}{\varepsilon_3 + \varepsilon_4}}.$$

Это соответствует константе распространения плазмон-поляритонной волны на границе областей 3 и 4 [54–56], а соответствующая строка выделена в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициента пропускания металлической плёнки для различных значений конического параметра  $\beta$

$\beta$	$ T_{TM}(\beta) $	$\arg(T_{TM}(\beta))$
0,88927	0,65404	-10,293
0,90927	0,68474	-7,4542
0,92927	0,72256	-3,9226
0,94927	0,77071	6,9967
0,96927	0,83517	7,2977
0,98927	0,92999	18,834
1,0093	1,5834	36,725
1,0293	2,7544	30,874
1,0493	5,4064	16,021
<b>1,0693</b>	<b>10,711</b>	<b>-43,195</b>
1,0893	5,8504	-99,360
1,1093	3,4329	-113,13
1,1293	2,4217	-118,07
1,1493	1,8768	-120,32
1,1693	1,5347	-121,41
1,1893	1,2982	-121,86
1,2093	1,1235	-121,92

1,2293	0,98786	-121,70
1,2493	0,87849	-121,27
1,2693	0,78751	-120,66

### 2.2. Прохождение широкополосного импульса с каустикой в виде кольца через тонкую плёнку

В случае распространения широкополосного импульса распределение поля имеет вид:

$$W(r, z, t) = c \int_{-\infty}^\infty \int_0^\infty F_i(k) S(\beta, k) T_{TM}(\beta, k) \times \left(\frac{\gamma(\beta)}{\varepsilon}\right) J_1(k\beta r) \exp(ik\sqrt{\varepsilon - \beta^2}z - ickt) \beta d\beta dk, \quad (24)$$

где функции  $S(\beta, k)$ ,  $T_{TM}(\beta, k)$ ,  $F_i(k)$  имеют вид (21), (18), (22) соответственно.

Продольная компонента поля описывается выражением

$$E_z(r, z, t) = i \int_0^\infty S(\beta, k) T_{TM}(\beta, k) J_0(k\beta r) \times \exp(ik\sqrt{\varepsilon_4 - \beta^2}z - ickt) \beta^2 d\beta dk. \quad (20б)$$

Полученное выражение описывает электрическое поле широкополосного пространственно-ограниченного импульса, выходящего из плёнки.

### 3. Численные результаты

На рис. 2, 3 представлены распределения продольной и поперечной составляющих электрического поля до и после прохождения металлической плёнки. Рассмотрен случай, когда функция  $A(r)$  из формулы (21) имеет следующий вид:

$$A(r) = \frac{r}{\sigma} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right).$$

Расчёт проводился при следующих параметрах:  $R_0 = 6$  см – радиус входного пучка,  $\sigma = R_0 / 6$  – параметр (радиус перетяжки) гауссового распределения,  $f = 1$  см – расстояние от входной плоскости до металлической плёнки,  $d = 50$  нм – толщина металлической плёнки,  $\lambda = 488$  нм,  $\tau = 10\lambda / c$ ,  $c$  – скорость света в материале, в котором распространяется сфокусированная волна.

$$\varepsilon_1 = 1; \varepsilon_2 = 2,25; \varepsilon_3 = -7,9 + 0,736i; \varepsilon_4 = 1.$$

На границе областей 3 и 4 постоянная распространения плазмона  $\beta_0 = 1,069$ .

На рис. 4 представлена зависимость от времени огибающей продольной составляющей амплитуды электрического поля в центре пучка на выходе из металлической плёнки для одного импульса. Результат совпадает с результатами в статье [56]. Следует отметить, что распределение амплитуды поля на входе и выходе металлической плёнки сильно напоминает функцию Бесселя с константой распространения, соответствующей плазмон-поляритонной волне на границе областей 3 и 4. Именно это совпадение натолкнуло некоторых авторов на мысль, что данный вид распределения интенсивности электрического поля связан с появлением плазмон-поляритонной волны [56].

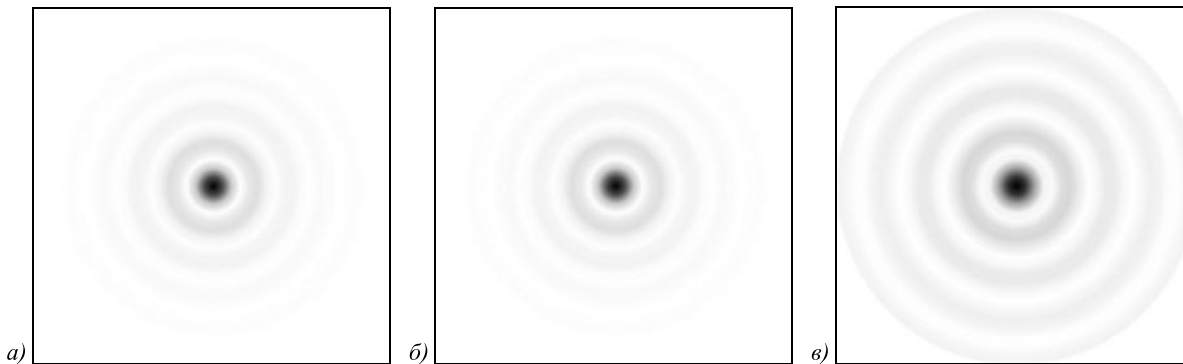


Рис. 2. Распределение амплитуды продольной компоненты электрического поля, падающего на металлическую плёнку (а), распределение амплитуды продольной компоненты электрического поля на выходе из металлической плёнки (б), распределение, соответствующее функции  $J_0^2(k\beta_0 r)$  (в); (негативные изображения)

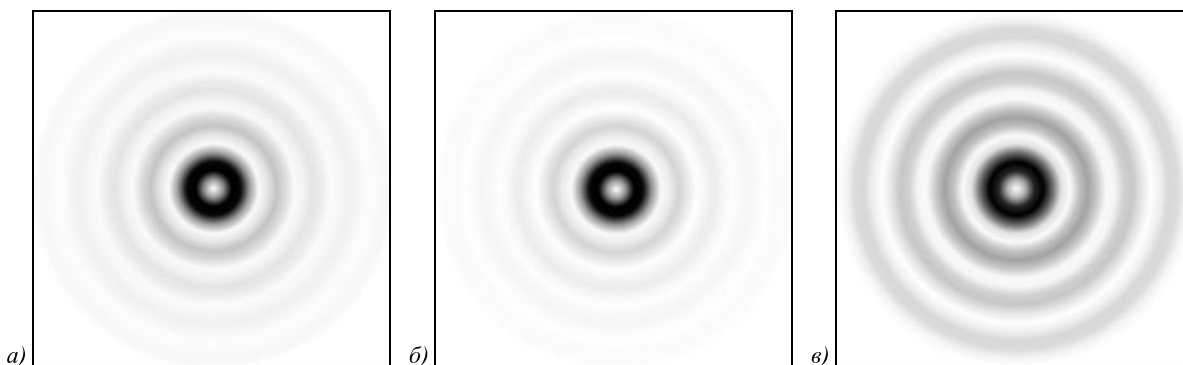


Рис. 3. Распределение амплитуды радиальной компоненты электрического поля, падающего на металлическую плёнку (а), распределение амплитуды радиальной компоненты электрического поля на выходе из металлической плёнки (б), распределение, соответствующее функции  $J_1^2(k\beta_0 r)$  (в); (негативные изображения)

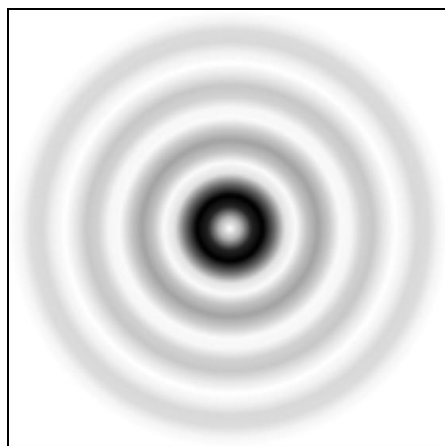


Рис. 4. Зависимость от времени огибающей продольной составляющей амплитуды электрического поля в центре пучка на выходе из металлической плёнки

На самом же деле распределение поля на выходе повторяет распределение на входе (с точностью до ослабления, обусловленного поглощением внутри металлической плёнки). Детальный анализ также показывает, что дифракционные кольца на рис. 2б, в (а также рис. 3б, в) смещены друг относительно друга. Кроме того, размер центрального пика на этих картинках отличается приблизительно на 10%. Эти факты позволяют сделать вывод, что форма импульса на выходе из металлической плёнки никак не связана с

появлением плазмон-поляритонной волны на границе металлической плёнки.

Ошибка, которую допустил автор работы [56], состоит в том, что он аппроксимировал выражения для коэффициента пропускания дельта-функцией Дирака. На самом деле выражение для коэффициента пропускания приближённо имеет вид  $T_{TM}(\beta, k) = C / (\beta - \beta_0)$ . Это выражение при определённых условиях можно заменить на функцию Дирака (на этом основано вычисление интегралов с помощью теории вычетов [57]), но в данном случае это будет слишком грубым приближением.

### Заключение

Разработанный метод позволил получить решение задачи дифракции пучка с радиальной поляризацией на металлической плёнке без использования суперкомпьютера. Использование метода стационарной фазы для вычисления пространственно-частотного спектра сходящейся волны также позволило сократить время расчёта. Показано, что форма распределения поля на выходе из плёнки не связана с появлением плазмон-поляритонной волны, а повторяет распределение поля на входе металлической плёнки.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № НШ-4128.2012.9 и грантов РФФИ № 10-07-

00553, № 11-07-00153, №11-07-13164 и № 11-07-12036, госконтрактов с Министерством образования и науки РФ №№ 07.514.11.4055, 07.514.11.4060, 02.740.11.089, 02.740.11.0841.

### Литература

1. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements / edited by Victor A. Soifer. – A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 765 p.
2. **Clark, P.P.** Production of kinoform by single point diamond machining / P.P. Clark, C. Londono // Optics News. – 1989. – Vol. 15. – P. 39-40.
3. **Абульханов, С.Р.** Методы изготовления элементов дифракционной оптики резанием на станках с ЧПУ / С.Р. Абульханов, Н.Л. Казанский, Л.Л. Досколович, О.Ю. Казакова // СТИН Станки Инструмент. – 2011. – № 9. – С. 20-27.
4. **Poleshchuk, A.G.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure / A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, A.A. Kharissov, V.V. Cherkashin, V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, A.G. Verhoglyad // Applied Optics. – 1999. – Vol. 38, N 8. – P. 1295-1301.
5. Технология создания ДОО / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Соيفер, Г.В. Успенев // Методы компьютерной оптики; под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2000. – С. 239-310.
6. **Казанский, Н.Л.** Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики / Н.Л. Казанский // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 54-62.
7. **Голуб, М.А.** Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // Автометрия. – 1988. – № 1. – С. 70-82.
8. **Голуб, М.А.** Математическая модель фокусировки излучения элементами компьютерной оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, В.А. Соифер // Научное приборостроение. – 1993. – Т. 3, № 1. – С. 9-23.
9. **Казанский, Н.Л.** Математическое моделирование оптических систем / Н.Л. Казанский. – Самара: СГАУ, 2005. – 240 с.
10. **Казанский, Н.Л.** Вычислительный эксперимент с линзой Френеля / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 1988. – № 3. – С. 22-28.
11. **Голуб, М.А.** Многоградационная линза Френеля / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, Г.В. Успенев, Д.М. Якуненкова // Журнал технической физики. – 1991. – Т. 61, № 4. – С. 195-197.
12. **Голуб, М.А.** Элементы компьютерной оптики для коррекции аберраций изображающих систем / М.А. Голуб, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // Компьютерная оптика. – 1988. – № 3. – С. 3-7.
13. **Greisukh, G.I.** Optics of Diffractive and Gradient-Index Elements and Systems / G.I. Greisukh, S.T. Bobrov and S.A. Stepanov. – Bellingham, Wash.: SPIE Press, 1997. – 391 p.
14. **Голуб, М.А.** Формирование эталонных волновых фронтов элементами компьютерной оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // Компьютерная оптика. – 1990. – № 7. – С. 3-26.
15. **Казанский, Н.Л.** Коррекция волновых фронтов / Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.А. Соифер // Методы компьютерной оптики; под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2000. – С. 542-579.
16. **Голуб, М.А.** Фокусировка когерентного излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7, Вып. 10. – С. 618-623.
17. Расчёт и исследование когерентного волнового поля в фокальной области радиально-симметричных оптических элементов / А.Г. Васин, М.А. Голуб, В.А. Данилов, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, Г.В. Уваров // Препринт № 304 ФИАН СССР. – М.: ФИАН, 1983. – 38 с.
18. **Голуб, М.А.** Машинный синтез фокусирующих элементов для СО<sub>2</sub>-лазера / М.А. Голуб, В.П. Дегтярёва, А.Н. Климов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8, № 13. – С. 449-451.
19. **Голуб, М.А.** Дифракционный расчёт оптического элемента, фокусирующего в кольцо / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, С.И. Харитонов // Автометрия. – 1987. – № 6. – С. 8-15.
20. **Казанский, Н.Л.** Исследование дифракционных характеристик фокусатора в кольцо методом вычислительного эксперимента / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 1992. – № 10-11. – С. 128-144.
21. **Finogenov, L.V.** 3D laser inspection of fuel assembly grid spacers for nuclear reactors based on diffractive optical elements / L.V. Finogenov, Yu.A. Lemeshko, P.S. Zav'yalov and Yu.V. Chugui // Measurement and Science Technology. – 2007. – Vol. 18, N 6. – P. 1779-1785.
22. Computer generated diffractive multi-focal lens / М.А. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39, N 6. – P. 1245-1251.
23. Расчёт дифракционных оптических элементов для фокусировки во внеосевые радиальные фокальные области / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.С. Павельев, В.А. Соифер // Автометрия. – 1995. – № 1. – С. 114-119.
24. Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // Optik. – 1995. – Vol. 101, N 2. – P. 37-41.
25. **Brenden, B.V.** Optical playback apparatus focusing system for producing a pre-scribed energy distribution along an axial focal zone / B.V. Brenden, J.T. Russel // Applied Optics. – 1984. – Vol. 23, N 19. – P. 3250-3253.
26. **Tremblay, R.** Laser plasmas optically pumped by focusing with axicon a CO<sub>2</sub>-TEA laser beam in a high-pressure gas / R. Tremblay, Y. D'Astons, G. Roy, M. Blanshard // Optics Communications. – 1979. – Vol. 28, N 2. – P. 193-196.
27. **Rioux, M.** Linear, annular and radial focusing with axicons and applications to laser machining / M. Rioux, R. Tremblay, P.A. Belanger // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17, N 10. – P. 1532-1536.
28. Focusators for laser-branding / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, G.V. Usplenjev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15, N 5. – P. 311-322.
29. **Казанский, Н.Л.** Процедура корректировки фазовой функции фокусатора по результатам вычислительного эксперимента / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 1987. – № 1. – С. 90-96.
30. **Хонина, С.Н.** Исследование формирования осевого отрезка с помощью оптимизированного бинарного ДОО / С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, Д.Г. Качалов, В.С. Павельев, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2010. – Том 34, № 3. – С. 350-359.
31. **Буфетова, Г.А.** Твёрдотельные неодимовые лазеры на основе монокристаллических волокон с поперечным

- градиентом показателя преломления / Г.А. Буфетова, В.В. Кашин, Д.А. Николаев, С.Я. Русанов, В.Ф. Серёгин, В.Б. Цветков, И.А. Щербаков, А.А. Яковлев // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36, № 7. – С. 616-619.
32. Трёхмерный контроль дистанционирующих решёток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов / П.С. Завьялов, Ю.А. Лемешко, Л.В. Финогенов, Ю.В. Чугуй // Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 2. – С. 23-31.
  33. **Калиберда, М.Е.** Операторный метод в задачах дифракции электромагнитных волн на плоских экранах / М.Е. Калиберда, Л.Н. Литвиненко, С.А. Погарский // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 9. – С. 1029-1035.
  34. **Бородинский, А.А.** Дифракция электромагнитных импульсов на металлической полоске / А.А. Бородинский, В.В. Земляков, А.М. Лерер // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т. 13, № 5. – С. 18-21.
  35. **Лерер, А.М.** Решение задачи дифракции электромагнитного импульса на двухмерных металлических телах в цилиндрической системе координат / А.М. Лерер, В.А. Лерер, Г.П. Синявский, В.В. Комаров // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т. 13, № 5. – С. 6-10.
  36. **Sun, Q.** Pulse duration dependent nonlinear propagation of a focused femtosecond laser pulse in fused silica / Q. Sun, H. Asahi, Y. Nishijima, N. Murazawa, K. Ueno and H. Misawa // Optics Express. – 2010. – Vol. 18, Issue 24. – P. 24495-24503.
  37. **Ma, Y.** Plasma channel formed by ultraviolet laser pulses at 193 nm in air / Y. Ma, X. Lu, T. Xi, Q. Gong and J. Zhang // Chinese Optics Letters. – 2009. – Vol. 7, Issue 9. – P. 865-868.
  38. **Nuter, R.** Pulse chirping and ionization of O<sub>2</sub> molecules for the filamentation of femtosecond laser pulses in air / R. Nuter and L. Bergé // J. Opt. Soc. Am. B. – 2006. – Vol. 23, N 5. – P. 874-884.
  39. **Fuchs, U.** Ultra-short pulse propagation in complex optical systems / U. Fuchs, U. Zeitner and A. Tünnermann // Optics Express. – 2005. – Vol. 13, Issue 10. – P. 3852-3861.
  40. **Головашкин, Д.Л.** Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соифер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с. – ISBN 978-5-9221-0845-4.
  41. **Berini, P.** Long-Range Surface Plasmons on Ultrathin Membranes / P. Berini, R. Charbonneau and N. Lahoud // Nano Letters. – 2007. – Vol. 7, Issue 5. – P. 1376-1380.
  42. **Lee, I.** Dispersion characteristics of channel plasmon polariton waveguides with step-trench-type grooves / I. Lee, J. Jung, J. Park, H. Kim and B. Lee // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, Issue 25. – P. 16596-16603.
  43. **Hohenau, A.** Dielectric optical elements for surface plasmons / A. Hohenau, J.R. Krenn, A.L. Stepanov, A. Drezet, H. Ditlbacher, B. Steinberger, A.L. Leitner, F.R. Aussenegg // Optics Letters. – 2005. – Vol. 30, Issue 8. – P. 893-895.
  44. **Radko, I.P.** Surface plasmon polariton beam focusing with parabolic nanoparticle chains / I.P. Radko, S.I. Bozhevolyai, A.B. Evlyukhin and A. Boltasseva // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, Issue 11. – P. 6576-6582.
  45. **Fan, X.** Nanoscale metal waveguide arrays as plasmon / X. Fan, G.P. Wang // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31, Issue 9. – P. 1322-1324.
  46. **Steele, J.M.** Resonant and non-resonant generation and focusing of surface plasmons with circular gratings / J.M. Steele, Z. Liu, Y. Wang, X. Zhang // Optics Express. – 2006. – Vol. 14, Issue 12. – P. 5664-5670.
  47. **Головашкин, Д.Л.** Расчёт дифракции на оптическом микрорельефе методом FDTD / Д.Л. Головашкин, Н.Л. Казанский, С.А. Малышева. – Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 236 с. – ISBN-13: 978-3-8454-0996-2; ISBN-10: 3845409967.
  48. **Golovashkin, D.L.** Mesh Domain Decomposition in the Finite-Difference Solution of Maxwell's Equations / D.L. Golovashkin and N.L. Kazanskiy // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2009. – Vol. 18, N 3. – P. 203-211.
  49. **Golovashkin, D.L.** Solving Diffractive Optics Problem using Graphics Processing Units / D.L. Golovashkin and N.L. Kazanskiy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – Vol. 20, N 2. – P. 85-89.
  50. **Казанский, Н.Л.** Компактная запись решений системы уравнений Максвелла в пространственно-частотном представлении / Н.Л. Казанский, М.Л. Каляев, С.И. Харитонов // Антенны. – 2007. – № 10. – С. 13-21.
  51. Асимптотический метод расчёта поля от оптических элементов, обладающих зонной структурой / С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, М.Л. Каляев // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 4. – С. 7-18.
  52. **Kazanskiy, N.L.** Application of a pseudogeometrical optical approach for calculation of the field formed by a focuser / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Optics & Laser Technology. – 1996. – Vol. 28, N 4. – P. 297-300.
  53. **Soifer, V.A.** Synthesis of a Binary DOE Focusing into an Arbitrary Curve, Using the Electromagnetic Approximation / V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – Vol. 29, N 4-5. – P. 237-247.
  54. **Досколович, Л.Л.** Интегральные представления решений уравнений Максвелла в виде спектра поверхностных электромагнитных волн / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 151-154.
  55. **Bezus, E.A.** Scattering suppression in plasmonic optics using a simple two-layer dielectric structure / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich and N.L. Kazanskiy // Applied Physics Letters. – 3 June 2011. – Vol. 98, N 22. – P. 221108-221111.
  56. **Zhan, Q.** Evanescent Bessel beam generation via surface plasmon resonance excitation by a radially polarized beam / Q. Zhan // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31, N 11. – P. 1726-1728.
  57. **Свешников, А.Г.** Теория функции комплексной переменной / А.Г. Свешников, А.Н. Тихонов. – М.: Наука, 1979. – 317 с.

### References

1. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements / edited by Victor A. Soifer. – A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 765 p.
2. **Clark, P.P.** Production of kinoform by single point diamond machining / P.P. Clark, C. Londono // Optics News. – 1989. – Vol. 15. – P. 39-40.
3. **Abulhanov, S.R.** Methods of manufacturing diffractive optical elements by cutting on machines with CNC / S.R. Abulhanov, N.L. Kazanskiy, L.L. Doskolovich, O.Yu. Kazakova // Machine Tool STIN. – 2011. – N 9. – P. 20-27. – (In Russian).
4. **Poleshchuk, A.G.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary struc-

- ture / A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, A.A. Kharissov, V.V. Cherkashin, V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, A.G. Vehoglyad // *Applied Optics*. – 1999. – Vol. 38, N 8. – P. 1295-1301.
5. Technology of DOE Fabrication / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, G.V. Uspleneyev // *Methods of Computer Optics* / Ed. by V.A. Soifer. – Moscow: "Fizmatlit" Publisher, 2000. – P. 239-310. – (In Russian).
  6. **Kazanskiy, N.L.** Research and Development Center of diffractive optics / N.L. Kazanskiy // *Proceedings of the Samara Scientific Center of RAS*. – 2011. – Vol. 13, N 4. – P. 54-62. – (In Russian).
  7. **Golub, M.A.** Computational experiment with plane optical elements / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 1988. – N 1. – P. 78-89. – (In Russian).
  8. **Golub, M.A.** A mathematical model of radiation focusing by elements of computer optics / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // *Scientific Instrument*. – 1993. – Vol. 3, N 1. – P. 9-23. – (In Russian).
  9. **Kazanskiy, N.L.** Mathematical simulation of optical systems / N.L. Kazanskiy. – Samara: "SSAU" Publisher, 2005. – 240 p. – (In Russian).
  10. **Kazanskiy, N.L.** Numerical experiment with a Fresnel lens / N.L. Kazanskiy // *Computer Optics*. – 1988. – N 3. – P. 22-28. – (In Russian).
  11. **Golub, M.A.** Multilevel Fresnel lens / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer, G.V. Uspleneyev, D.M. Yakunenkov // *Journal of Technical Physics*. – 1991. – Vol. 61, N 4. – P. 195-197. – (In Russian).
  12. **Golub, M.A.** The elements of computer optics for aberration correction of optical systems / M.A. Golub, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // *Computer Optics*. – 1988. – N 3. – P. 3-7. – (In Russian).
  13. **Greisukh, G.I.** Optics of Diffractive and Gradient-Index Elements and Systems / G.I. Greisukh, S.T. Bobrov and S.A. Stepanov. – Bellingham, Wash.: SPIE Press, 1997. – 391 p.
  14. **Golub, M.A.** Formation of the reference wave fronts using elements of computer optics / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // *Computer Optics*. – 1990. – N 7. – P. 3-26. – (In Russian).
  15. **Kazanskiy, N.L.** Correction of wave fronts / N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // *Methods of computer optics* / ed. by V.A. Soifer. – Moscow: "Fizmatlit" Publisher, 2000. – P. 542-579. – (In Russian).
  16. **Golub, M.A.** Focusing coherent radiation in a given region of space with the help of computer generated holograms / M.A. Golub, S.V. Karpeev, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // *Technical Physics Letters*. – 1981. – Vol. 7, N 10. – P. 618-623. – (In Russian).
  17. Calculation and investigation of the coherent wave field in the focal region of the radially symmetric optical elements / A.G. Vasin, M.A. Golub, V.A. Danilov, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer, G.V. Uvarov // *Preprint № 304 of Physics Institute of the Academy of Sciences of UdSSR*. – Moscow: "P. Physics Institute of AS" Publisher, 1983. – 38 p. – (In Russian).
  18. **Golub, M.A.** Machine synthesis of focusing elements for CO<sub>2</sub>-laser / M.A. Golub, V.P. Degtyareva, A.N. Klimov, V.V. Popov, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // *Technical Physics Letters*. – 1982. – Vol. 8, N 13. – P. 449-451. – (In Russian).
  19. **Golub, M.A.** Diffraction calculation for an optical element which focuses into a ring / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer and S.I. Kharitonov // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 1987. – N 6. – P. 7-14. – (In Russian).
  20. **Kazanskiy, N.L.** Investigation of diffraction characteristics of focuser into a ring by computer simulation / N.L. Kazanskiy // *Computer Optics*. – 1992. – N 10-11. – P. 128-144. – (In Russian).
  21. **Finogenov, L.V.** 3D laser inspection of fuel assembly grid spacers for nuclear reactors based on diffractive optical elements / L.V. Finogenov, Yu.A. Lemeshko, P.S. Zavyalov and Yu.V. Chugui // *Measurement and Science Technology*. – 2007. – Vol. 18, N 6. – P. 1779-1785.
  22. Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1992. – Vol. 39, N 6. – P. 1245-1251.
  23. The calculation of diffractive optical elements for focusing on off-axis radial focal area / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 1995. – N 1. – P. 114-119. – (In Russian).
  24. Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // *Optik*. – 1995. – Vol. 101, N 2. – P. 37-41.
  25. **Brenden, B.B.** Optical playback apparatus focusing system for producing a pre-scribed energy distribution along an axial focal zone / B.B. Brenden, J.T. Russel // *Applied Optics*. – 1984. – Vol. 23, N 19. – P. 3250-3253.
  26. **Tremblay, R.** Laser plasmas optically pumped by focusing with axicon a CO<sub>2</sub>-TEA laser beam in a high-pressure gas / R. Tremblay, Y. D'Astons, G. Roy, M. Blanshard // *Optics Communications*. – 1979. – Vol. 28, N 2. – P. 193-196.
  27. **Rioux, M.** Linear, annular and radial focusing with axicons and applications to laser machining / M. Rioux, R. Tremblay, P.A. Belanger // *Applied Optics*. – 1978. – Vol. 17, N 10. – P. 1532-1536.
  28. Focusators for laser-branding / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, G.V. Uspleneyev // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1991. – Vol. 15, N 5. – P. 311-322.
  29. **Kazanskiy, N.L.** Correction of focuser phase function by computer-experimental methods / N.L. Kazanskiy // *Computer Optics*. – 1987. – N 1. – P. 90-96. – (In Russian).
  30. **Khonina, S.N.** Investigation of the formation of the axial segment with an optimized binary DOE / S.N. Khonina, R.V. Skidanov, D.G. Kachlov, V.S. Pavelyev, O.Yu. Moiseev // *Computer Optics*. – 2010. – Vol. 34, N 3. – P. 350-359. – (In Russian).
  31. **Bufetova, G.A.** Neodymium-doped graded-index single-crystal fibre lasers / G.A. Bufetova, V.V. Kashin, D.A. Nikolaev, S.Ya. Rusanov, V.F. Seregin, V.B. Tsvetkov, I.A. Shcherbakov, A.A. Yakovlev // *Quantum Electronics*. – 2006. – Vol. 36, N 7. – P. 616-619. – (In Russian).
  32. Three-Dimensional Inspection of Grid Spacers of Fuel Assemblies of Nuclear Reactors Using Diffractive Optical Elements / P.S. Zavyalov, Yu.A. Lemeshko, L.V. Finogenov and Yu.V. Chugui // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2008. – Vol. 44, N 2. – P. 111-117. – (In Russian).
  33. **Kaliberda, M.E.** Operator method in problems of diffraction of electromagnetic waves on a flat screen / M.E. Kaliberda, L.N. Litvinenko, S.A. Pogarsky // *Radio engineering and electronics*. – 2009. – T. 54, N 9. – P. 1029-1035. – (In Russian).
  34. **Borodinsky, A.A.** Diffraction of electromagnetic pulses on the metallic strip / A.A. Borodinsky, V.V. Zemlyakov,



- A.M. Lehrer // Electromagnetic waves and electron-nye system. – 2008. – V. 13, N 5. – P. 18-21. – (In Russian).
35. **Lehrer, A.** Solution of the problem of diffraction of an electromagnetic pulse in the two-dimensional metallic bodies in a cylindrical dielectric system of coordinates / A. Lehrer, V.A. Lehrer, G.P. Sinyavsky, V. Komarov // Electromagnetic waves and electronic systems. – 2008. – V. 13, N 5. – P. 6-10. – (In Russian).
  36. **Sun, Q.** Pulse duration dependent nonlinear propagation of a focused femtosecond laser pulse in fused silica / Q. Sun, H. Asahi, Y. Nishijima, N. Murazawa, K. Ueno and H. Misawa // Optics Express. – 2010. – Vol. 18, Issue 24. – P. 24495-24503.
  37. **Ma, Y.** Plasma channel formed by ultraviolet laser pulses at 193 nm in air / Y. Ma, X. Lu, T. Xi, Q. Gong and J. Zhang // Chinese Optics Letters. – 2009. – Vol. 7, Issue 9. – P. 865-868.
  38. **Nuter, R.** Pulse chirping and ionization of O<sub>2</sub> molecules for the filamentation of femtosecond laser pulses in air / R. Nuter and L. Bergé // J. Opt. Soc. Am. B. – 2006. – Vol. 23, N 5. – P. 874-884.
  39. **Fuchs, U.** Ultra-short pulse propagation in complex optical systems / U. Fuchs, U. Zeitner and A. Tünnermann // Optics Express. – 2005. – Vol. 13, Issue 10. – P. 3852-3861.
  40. **Diffraction computer optics** / D.L. Golovashkin, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, S.N. Khonina; Ed. by V.A. Soifer. – Moscow: “Fizmatlit” Publisher, 2007. – 736 p. – ISBN 978-5-9221-0845-4. – (In Russian).
  41. **Berini, P.** Long-Range Surface Plasmons on Ultrathin Membranes / P. Berini, R. Charbonneau and N. Lahoud // Nano Letters. – 2007. – Vol. 7, Issue 5. – P. 1376-1380.
  42. **Lee, I.** Dispersion characteristics of channel plasmon polariton waveguides with step-trench-type grooves / I. Lee, J. Jung, J. Park, H. Kim and B. Lee // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, Issue 25. – P. 16596-16603.
  43. **Hohenau, A.** Dielectric optical elements for surface plasmons / A. Hohenau, J.R. Krenn, A.L. Stepanov, A. Drezet, H. Ditlbacher, B. Steinberger, A.L. Leitner, F.R. Aussenegg // Optics Letters. – 2005. – Vol. 30, Issue 8. – P. 893-895.
  44. **Radko, I.P.** Surface plasmon polariton beam focusing with parabolic nanoparticle chains / I.P. Radko, S.I. Bozhevolynyi, A.B. Evlyukhin and A. Boltasseva // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, Issue 11. – P. 6576-6582.
  45. **Fan, X.** Nanoscale metal waveguide arrays as plasmon / X. Fan, G.P. Wang // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31, Issue 9. – P. 1322-1324.
  46. **Steele, J.M.** Resonant and non-resonant generation and focusing of surface plasmons with circular gratings / J.M. Steele, Z. Liu, Y. Wang, X. Zhang // Optics Express. – 2006. – Vol. 14, Issue 12. – P. 5664-5670.
  47. **Golovashkin, D.L.** The computation of the optical diffractive microrelief by FDTD-method / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy, S.A. Malysheva. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 236 p. – ISBN-13: 978-3-8454-0996-2; ISBN-10: 3845409967. – (In Russian).
  48. **Golovashkin, D.L.** Mesh Domain Decomposition in the Finite-Difference Solution of Maxwell's Equations / D.L. Golovashkin and N.L. Kazanskiy // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2009. – Vol. 18, N 3. – P. 203-211.
  49. **Golovashkin, D.L.** Solving Diffractive Optics Problem using Graphics Processing Units / D.L. Golovashkin and N.L. Kazanskiy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – Vol. 20, N 2. – P. 85-89.
  50. **Kazanskiy, N.L.** Compact recording solutions of Maxwell's equations in the space-frequency domain / N.L. Kazanskiy, M.L. Kalyaev, S.I. Kharitonov // Antennas. – 2007. – N 10. – P. 13-21. – (In Russian).
  51. Asymptotic method of calculating the field of optical elements with the zone structure / S.I. Kharitonov, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, M.L. Kalyaev // Computer Optics. – 2007. – Vol. 31, N 4. – P. 7-18. – (In Russian).
  52. **Kazanskiy, N.L.** Application of a pseudogeometrical optical approach for calculation of the field formed by a focuser / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Optics & Laser Technology. – 1996. – Vol. 28, N 4. – P. 297-300.
  53. **Soifer, V.A.** Synthesis of a Binary DOE Focusing into an Arbitrary Curve, Using the Electromagnetic Approximation / V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – Vol. 29, N 4-5. – P. 237-247.
  54. **Doskolovich, L.L.** Integral representations of solutions of Maxwell's equations in the form of the spectrum of surface electromagnetic waves / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov // Computer Optics. – 2008. – Vol. 32, N 2. – P. 151-154. – (In Russian).
  55. **Bezus, E.A.** Scattering suppression in plasmonic optics using a simple two-layer dielectric structure / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich and N.L. Kazanskiy // Applied Physics Letters. – 3 June 2011. – Vol. 98, N 22. – P. 221108-221111.
  56. **Zhan, Q.** Evanescent Bessel beam generation via surface plasmon resonance excitation by a radially polarized beam / Q. Zhan // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31, N 11. – P. 1726-1728.
  57. **Sveshnikov, A.G.** The theory of functions of complex variables / A.G. Sveshnikov, A.N. Tikhonov. – Moscow: “Nauka” Publisher, 1979. – 317 p. – (In Russian).

## TRANSMISSION OF THE SPACE-LIMITED BROADBAND SYMMETRICAL RADIAL PULSES FOCUSED THROUGH A THIN FILM

*N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov  
Image Processing Systems Institute of the RAS,  
Samara State Aerospace University (National Research University)*

### Abstract

The behavior of spatially bounded pulses of broadband radially polarized propagating in a homogeneous space and the passage of thin metal films. It is shown that the shape of the field distribution at the exit of the film is not connected with the appearance of plasmon-polariton waves, and repeats the field distribution at the inlet of the metal film.

*Key words:* Maxwell equations, diffraction, wideband impulse.

*Сведения об авторах*

**Казанский Николай Львович**, 1958 года рождения. В 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 год), профессор, работает заместителем директора по научной работе и заведующим лабораторией дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Руководитель научно-образовательного центра компьютерной оптики, созданного совместно ИСОИ РАН и СГАУ, заведующий базовой (СГАУ в ИСОИ РАН) кафедрой высокопроизводительных вычислений. Является членом международных научных обществ *SPIE* и *IAPR*. Н.Л. Ка-

занский – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 240 статей, 7 монографий, 35 авторских свидетельств и патентов.

Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazansky.htm> .

E-mail: [kazansky@smr.ru](mailto:kazansky@smr.ru) .

**Nikolay Lvovich Kazanskiy** (b. 1958) graduated with honours (1981) from the S. P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU)), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Maths (1996) degrees from Samara State Aerospace University. He is the vice-director for research and the head of Diffractive Optics laboratory at the Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is the manager of the Research & Education Center of Computer Optics established jointly by SSAU and IPSI RAS, holding the chair of SSAU's base sub-department of High-Performance Computing at IPSI RAS. He is a SPIE and IAPR member. He is co-author of 240 scientific papers, 7 monographs, and 35 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.



**Харитонов Сергей Иванович**, старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики Учреждения Российской академии наук Института систем обработки изображений РАН, кандидат физико-математических наук. 1984 г. – окончил физический факультет Самарского государственного университета. 1993 г. – защитил кандидатскую диссертацию на тему «Асимптотические методы дифракционного расчёта фокусаторов лазерного излучения». 2010 г. – защитил докторскую диссертацию на тему «Асимптотические методы расчёта дифракции когерентного электромагнитного излучения на дифракционных оптических элементах». Область научных интересов: дифракционная, квантовая оптика, физика плазмы. В списке научных работ С.И. Харитонова 87 статей, 5 авторских свидетельств и патентов. E-mail: [prognoz2007@gmail.com](mailto:prognoz2007@gmail.com) .

**Sergey Ivanovich Kharitonov**, Senior Researcher of Laboratory of Diffractive Optics of Image Processing Systems Institute of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences. 1984 - graduated from the Physics Department of the Samara State University. 1993 – defended his dissertation "Asymptotic methods of calculation of the diffraction of laser radiation Focuser" 2010 г. – defended his doctoral thesis on "Asymptotic methods for calculating the diffraction of coherent electromagnetic radiation in diffractive optical elements" Research interests: diffraction, quantum optics, plasma physics. The list of scientific papers SI Kharitonov's 87 articles, 5 patents.

*Поступила в редакцию 27 сентября 2011 г.*