

Дифракционная модель эффекта безлинзовой фокусировки электромагнитного излучения в ближней зоне микроотверстий

В. М. Сердюк

*Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь,
e-mail: serdyukvm@mail.ru*

Строгое решение задачи электромагнитной дифракции на отверстии в идеально проводящем экране рассматривается в качестве основы теоретической модели явления безлинзовой фокусировки излучения в ближней зоне микроотверстий в непрозрачных экранах. Предложен теоретический критерий определения условий возникновения данного явления в зависимости от физических параметров дифракционной системы.

Ключевые слова: строгая теория дифракции; ближняя зона; фокусировка электромагнитного излучения; микроотверстие.

Diffraction model of the phenomenon of lensless electromagnetic focusing in the near zone of micro openings

V. M. Serdyuk

*Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus,
e-mail: serdyukvm@mail.ru*

The rigorous solution of the problem of electromagnetic diffraction by an opening in the perfectly conducting screen is considered as a theoretical model of the phenomenon of lensless focusing in the near zone of micro openings in opaque screens. The theoretical criterion is proposed for determining the conditions of the given phenomenon arising in dependence of physical parameters of a diffraction system.

Keywords: rigorous diffraction theory; near zone; electromagnetic focusing; micro opening.

Введение

Недавно было обнаружено, что в результате прохождения через микроотверстия в непрозрачных экранах оптическое излучение может фокусироваться в ближней зоне, формируя дифракционное пятно размером в несколько раз меньше размеров самого отверстия [1, 2]. Для теоретического описания данного эффекта привлекались различные модели, основанные на приближении Френеля-Кирхгофа [1, 2], однако такое приближение исходит из искаженных представлений о поле на отверстии, и потому его нельзя признать легитимным для полей в ближней зоне микроотверстий размером порядка длины волны, у которых только и наблюдается эффект фокусировки. Кроме того, для дифракционных систем малого размера заметное влияние на дифракционное поле оказывают диэлектрические объекты, подвергаемые воздействию поля, например, изучаемые материалы в спектроскопии, слой фоторезиста в оптической литографии или направляющие элементы в интегральной оптике. В случае макроразмерных дифракционных систем влиянием таких объектов на поле пренебрегают, однако для микроотверстий присутствие

дополнительных диэлектриков может заметно изменять пространственную картину полей. Поэтому адекватная теория явления безлинзовой фокусировки должна строиться только на основе строгой теории дифракции на отверстиях в непрозрачных экранах с учетом тонкого плоского диэлектрического слоя за экраном как простейшей модели объекта воздействия электромагнитного излучения. В настоящей работе описана методика определения оптимальных условий реализации данного явления, построенная на основе такой теории [3, 4].

1. Теория

В качестве упрощенной модели физической микросистемы, дающей эффект безлинзовой фокусировки в ближней зоне, можно рассмотреть плоский идеально проводящий экран конечной толщины с щелевым либо круговым отверстием (рис. 1), на некотором расстоянии от которого располагается тонкий плоский диэлектрический слой, выполняющий роль объекта воздействия дифракционного излучения от отверстия. Для фиксирования тонкого слоя в пространстве и придания механической устойчивости всей системе слой может помещаться на толстой диэлектрической подложке, толщина которой может считаться бесконечно большой по сравнению с микроразмерами остальных физических объектов системы. Строгое решение задачи дифракции плоской электромагнитной волны на такой преобразующей системе дано в работах [3, 4]. Оно позволяет рассчитать пространственную картину поля дифракции во всех точках пространства, однако нас будет интересовать поле только в тонком диэлектрическом слое, который считается объектом воздействия и регистрирующей средой для электромагнитного излучения. Пространственная картина его распределения внутри слоя создает дифракционное изображение отверстия в слое, подверженное различным искажениям и преобразованиям.

Предположим, что в результате дифракции электромагнитной волны на проводящем экране с отверстием в диэлектрическом слое сформировалось электрическое поле $E(x,y)$, пространственные компоненты которого можно рассчитать

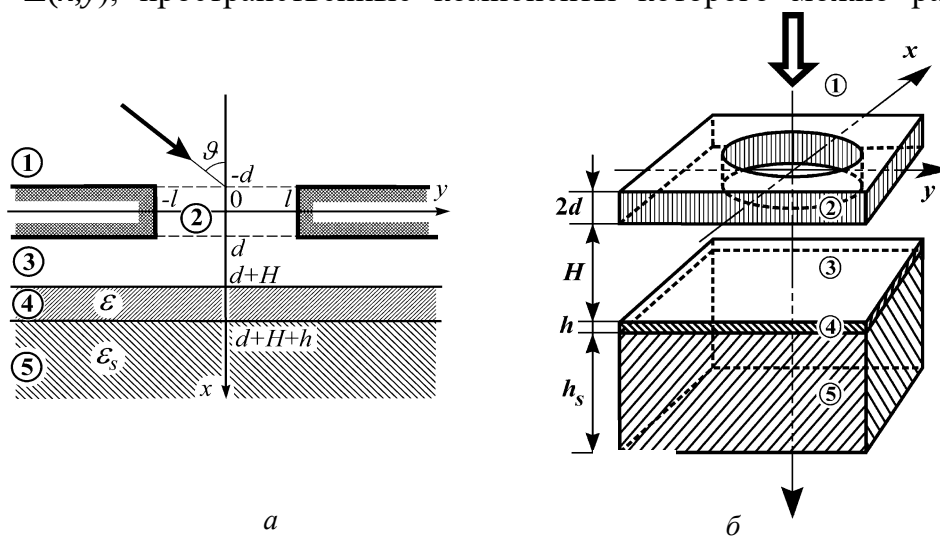


Рис. 1. Дифракция волны в плоском экране конечной толщины в присутствии плоского диэлектрического слоя на подложке за экраном: а – на щели; б – на круговом отверстии

согласно решению дифракционной задачи, представленному в [3, 4]. Расчеты показывают, что по глубине слоя дифракционное поле меняется слабо, поэтому в данном направлении его можно усреднить, учитывая зависимость относительной плотности электрической энергии только от одной тангенциальной координаты y :

$$W(y) = \varepsilon \frac{1}{W_0 h} \int_{d+H}^{d+H+h} |E(x, y)|^2 dx, \quad (1)$$

где W_0 – плотность электрической энергии падающей плоской волны, $\varepsilon = n^2$ – диэлектрическая проницаемость пленки, n – ее показатель преломления, $E(x, y)$ – величина электрического поля внутри пленки, зависящая от координат, h – толщина диэлектрической пленки, H – толщина воздушной прослойки между пленкой и экраном, d – полутолщина последнего.

Функция (1), зависящая от тангенциальной координаты y , фактически определяет дифракционное изображение щели в диэлектрической пленке. Для характеристики таких изображений предлагается использовать скалярную величину – показатель фокусировки, т.е. показатель относительного уменьшения дифракционного изображения щели, который полагаем равным

$$F = l/l_{\text{eff}} = 2lW_3 / (W_1W_2). \quad (2)$$

где $l_{\text{eff}} = W_1/(2W_{\text{eff}}) = W_1W_2/(2W_3)$ – эффективная полуширина дифракционного изображения щели, W_m – это интеграл от $W(y)$ (1) в степени m по всем y (m – целое число). Данное определение соответствует вычислению усредненного значения W_{eff} функции $W(y)$ (1) по поверхности пленки с весовой функцией, равной квадрату самой этой функции $W^2(y)$: $W_{\text{eff}} = W_3/W_2$.

Параметр F (2) демонстрирует, во сколько раз эффективный размер светового пятна в диэлектрической пленке оказывается меньше реальных размеров щели. Оценивая величину этого параметра по формуле (1) с помощью дифракционной модели [3, 4] при различных значениях полуширины щели l , толщины экрана d и воздушной прослойки H , можно определить области существования эффекта фокусировки, в которых параметр F достигает больших значений, заметно превышающих единицу. Рисунок 2 является примером расчета параметра F для частного случая, когда толщина диэлектрической пленки $h/\lambda = 1,2$, а показатели преломления пленки и подложки имеют соответствующие величины $n = 1,62$ и $n_s = 1,46$. Расчет проводился отдельно для двух возможных поляризаций этой волны, H и E , когда электрический либо магнитный вектор падающего поля ортогонален плоскости падения. Как видно, только для излучения H -поляризации наблюдаются явно выраженные максимумы и минимумы параметра фокусировки, тогда как излучение E -поляризации практически не подвержено эффекту аномально высокой фокусировки в микроотверстиях. Рисунок 2 показывает также, что эффект очень чувствителен к изменениям ширины щели $2l$ и толщины проводящего экрана $2d$: достаточно совсем небольшого изменения каждой из этих величин, всего на $0,2-0,4\lambda$, чтобы эффект потерялся.

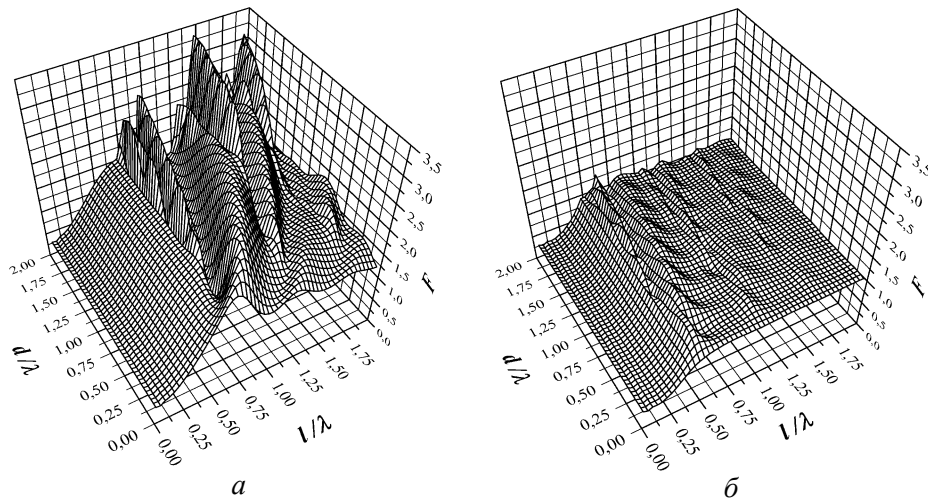


Рис. 2. Зависимость параметра фокусировки F изображения щели в пленке толщиной $h/\lambda = 1,2$ от полуширины щели l и полутолщины идеально проводящего экрана d в случае, когда толщина воздушной прослойки H составляет $0,2\lambda$:
 а – для H -поляризации нормально падающей плоской волны; (б) – для E -поляризации

Характерная картина распределения энергии поля (1) вдоль поверхности диэлектрической пленки при наличии и отсутствии эффекта показана на рис. 3. Тонкой линией показано идеальное изображение в виде аппроксимирующей ступеньки, пунктир воспроизводит ширину щели.

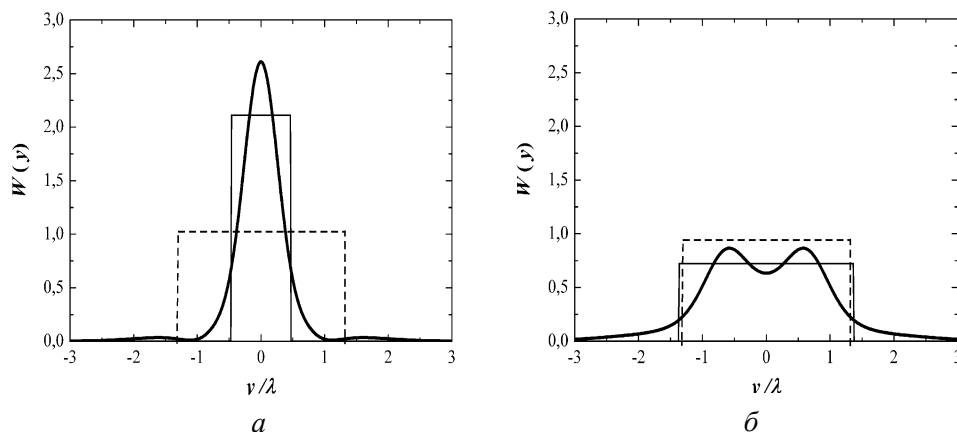


Рис. 3. Распределение плотности электрической энергии для дифракционного изображения щели в диэлектрической пленке толщиной $h/\lambda = 1,2$, возникающего в результате дифракции нормально падающей плоской волны на щели полушириной $l/\lambda = 1,32$ в идеально проводящем экране полутолщиной $d/\lambda = 1,2$ при толщине воздушной прослойки $H/\lambda = 0,6$:
 а – для H -поляризации; б – для E -поляризации

Для отверстия круговой геометрии (рис. 1, б) параметр фокусировки определяется аналогично. На рис. 4 приведены результаты расчета этого параметра в зависимости от радиуса кругового отверстия R и полутолщины идеально проводящего экрана d для дифракционной системы без диэлектриков и в присутствии диэлектрического слоя за отверстием. Из рисунка видно, насколько заметно изменяется картина дифракции при появлении диэлектрика в ближней зоне.

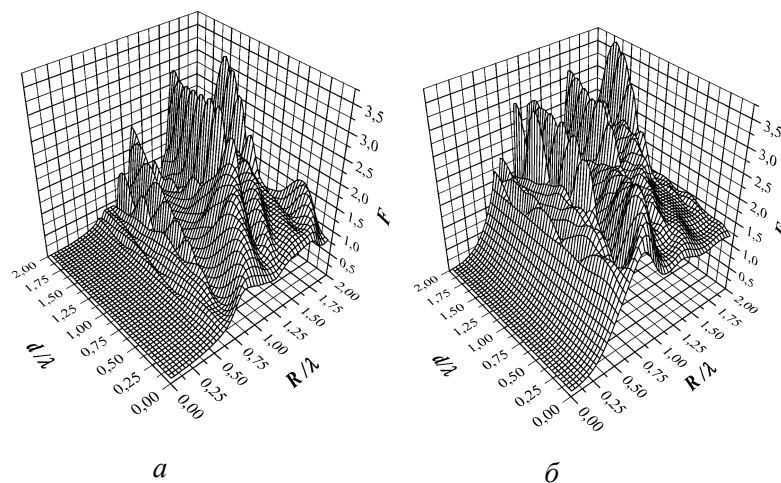


Рис. 4. Параметр фокусировки F изображения кругового отверстия как функция радиуса отверстия R и полутолщины идеально проводящего экрана d при дифракции линейно поляризованной плоской волны на экране с отверстием в пустом пространстве:
 a – без диэлектриков; $б$ – в диэлектрической пленке толщиной $h = 1,2\lambda$, расположенной на расстоянии $H = 0,2\lambda$ за экраном

Заключение

Основной результат настоящей работы сводится к тому, что последовательной теории дифракции электромагнитной волны на щелевом и круговом микроотверстиях в идеально проводящем экране вполне достаточно, чтобы объяснить основные закономерности явления безлинзовой фокусировки в ближней зоне таких отверстий. Следовательно, для объяснения данного явления нет оснований привлекать дополнительные представления о поверхностных плазмонах на поверхности проводящего экрана как источниках амплитудных аномалий, как это пытаются делать некоторые зарубежные исследователи [6]. На границе идеально проводящих объектов никакие поверхностные плазмоны невозможны, потому что внутри таких объектов электромагнитное поле должно быть равным нулю. А эффект фокусировки возникает вследствие интерференции волн за экраном, излучаемых полевыми модами отверстия на его выходной границе [4].

Библиографические ссылки

1. Obstructive micro diffracting structures as an alternative to plasmonics nano slits for making efficient microlenses / G. Vitrant [et al.] // *Optics Express*. 2012. Vol. 20, Issue 24. P. 26542–26547.
2. Single-slit focusing and its representations / M. R. Gonçalves [et al.] // *Applied Physics B*. 2017. Vol. 123, No 4. P. 1–22.
3. Сердюк В. М. Дифракция плоской электромагнитной волны на щели в проводящем экране произвольной толщины // *Журнал технической физики*. 2005. Т. 75, вып. 8. С. 113–120.
4. Serdyuk V. M. Theoretical investigation of electromagnetic diffraction focusing in the near zone of a sub-wavelength aperture // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. 2022. Vol. 50. Article 101017.
5. Serdyuk V. M. Diffraction of a plane electromagnetic wave by a circular aperture in a conducting screen of finite thickness // *Progress In Electromagnetics Research B*. 2023. Vol. 102. P. 99–114.
6. Squeezing millimeter waves through a single, nanometer-wide, centimeter-long slit / X. Chen [et al.] // *Scientific Reports*. 2014. Vol. 4. Article 6722.