

## Знакомство с программой Comsol 6.1

### Пример получения изображения в двояковогнутой линзе для рентгеновского излучения в мягком диапазоне длин волн 2-20 нм.

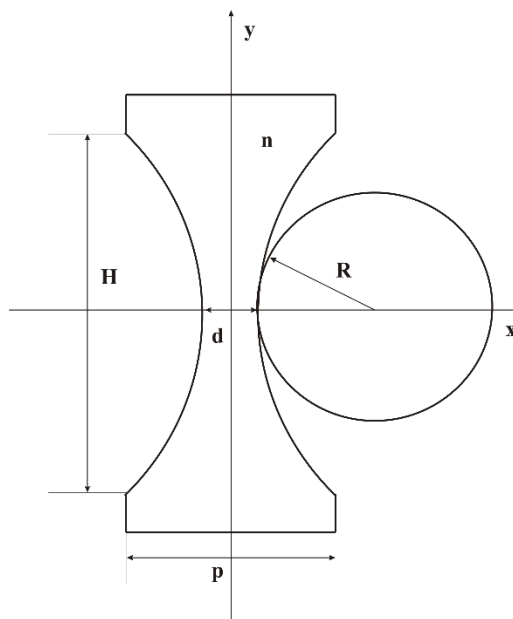
#### Краткое введение.

Для рентгеновского излучения мягкого диапазона волн и глубокого ультрафиолета практически для всех веществ, показатель преломления имеет следующую структуру.

$$n(\omega) = 1 - \delta(\omega) + i\gamma(\omega), \quad \delta, \gamma \ll 1$$

Так как действительная часть показателя преломления меньше единицы, то для фокусировки рентгеновского излучения используются двояковогнутые линзы.

Такая линза выглядит следующим образом.



Здесь  $R$  – радиус кривизны поверхности линзы в центральной части,  $d$  - толщина линзы в центральной части,  $p$  - толщина линзы в периферийной части,  $H$  - диаметр линзы (геометрическая апертура).

Преломляющие поверхности выбираем параболической формы. Уравнения для левой и правой параболы

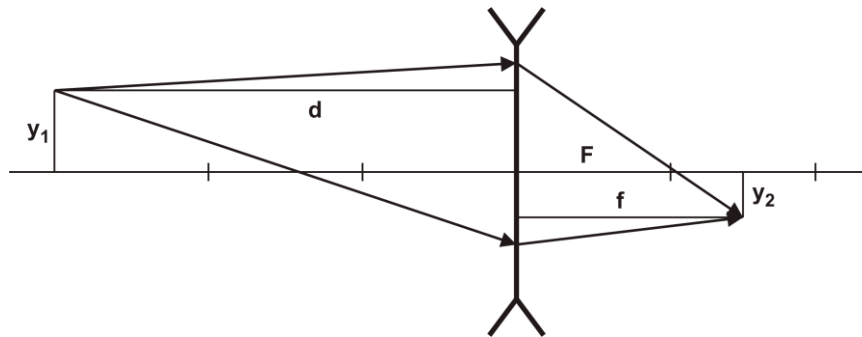
$$x = -\frac{d}{2} - \frac{y^2}{2R}, \quad x = +\frac{d}{2} + \frac{y^2}{2R}$$

Фокусное расстояние такой линзы определяется действительной частью показателя преломления, и вычисляется по формуле.

$$F = \frac{R}{2\delta}$$

Если диаметр линзы много больше ее толщины, то можно использовать формулу тонкой линзы.

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

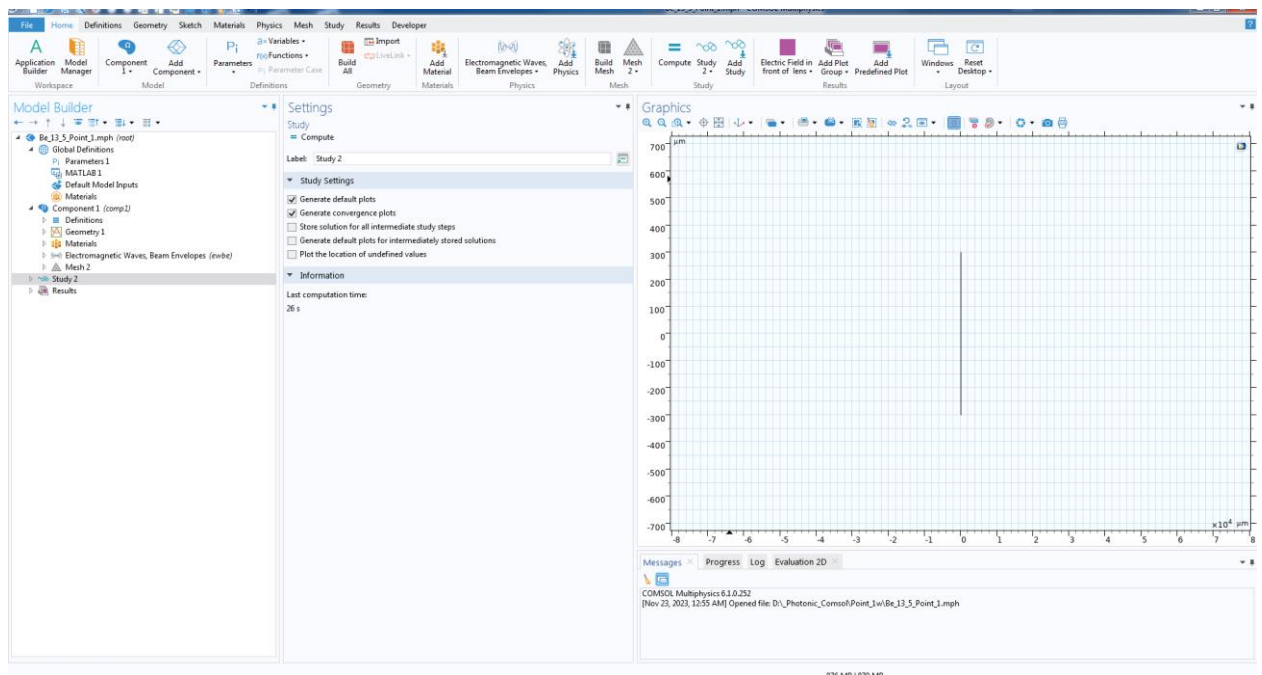


Коэффициент увеличения (уменьшения) поперечного размера объекта определяется формулой.

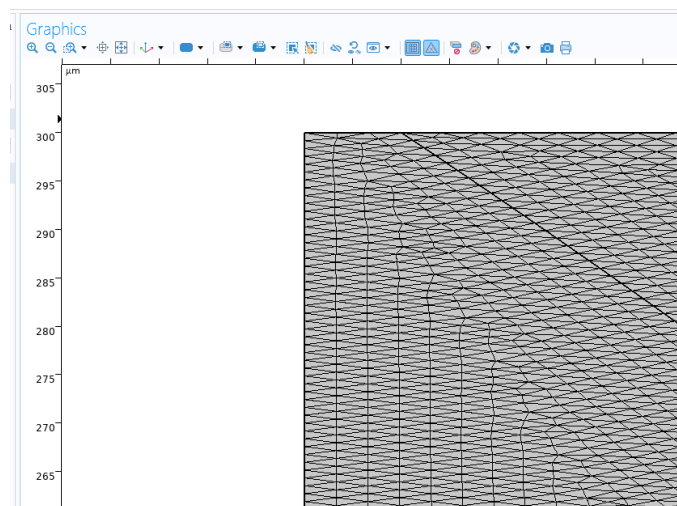
$$\Gamma = \frac{y_2}{y_1} = \frac{f}{d}$$

Для примера будем рассматривать линзу из бериллия (Beryllium) на длине волны рентгеновского излучения  $\lambda = 13.5 \text{ nm}$ . На такой длине волны показатель преломления бериллия имеет следующие параметры  $\delta = 0.011$ ,  $\gamma = 0.0015$ .

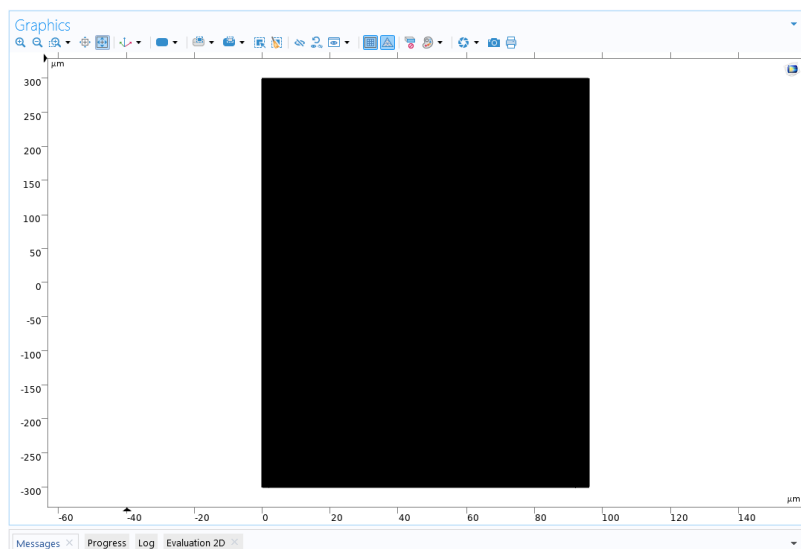
Начнем работу в Comsol'е на примере из ОРИОКС. Берем пример Test\_1. Скачаем и разархивируем, получаем папку Point\_1 с двумя файлами. Запускаем файл с расширением mph. Открывается окно программы Comsol.



\_ Строим сетку моделирования, в главном меню Build Mash. Чтобы увидеть сетку структуры в окне Graphics нажимаем кнопку Go to Default View > Go to View 1. Если хотим посмотреть детали сетки надо воспользоваться лупой Zoom Box.



Чтобы вернуть обычный размер нажимаем кнопку Zoom Extents.



\_ Запускаем Comsol на моделирование, в главном меню Build Compute. Посмотрим результаты моделирования.

\_ Нажимаем в окне Model Builder кнопку Electric Field in lens.

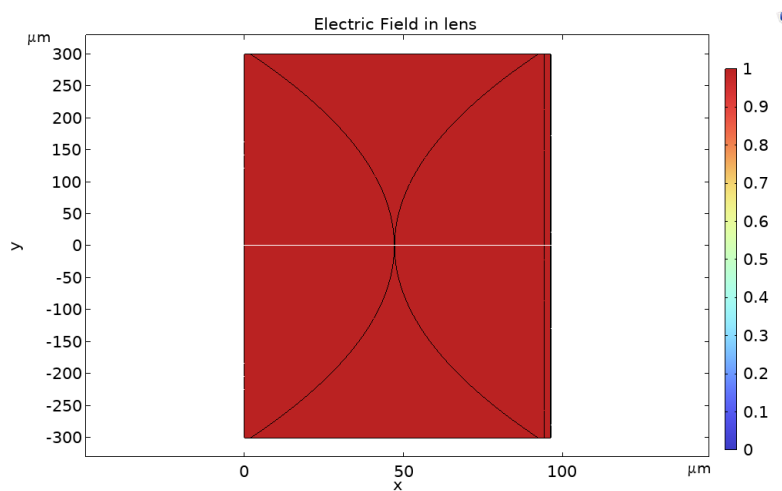


Рис.01

Это поле излучения внутри линзы. Белая линия – оптическая ось

\_ Нажимаем в окне Model Builder кнопку Electric Field in front of lens. Затем в окне Graphics нажимаем кнопки Go to Default View > Go to View 2.

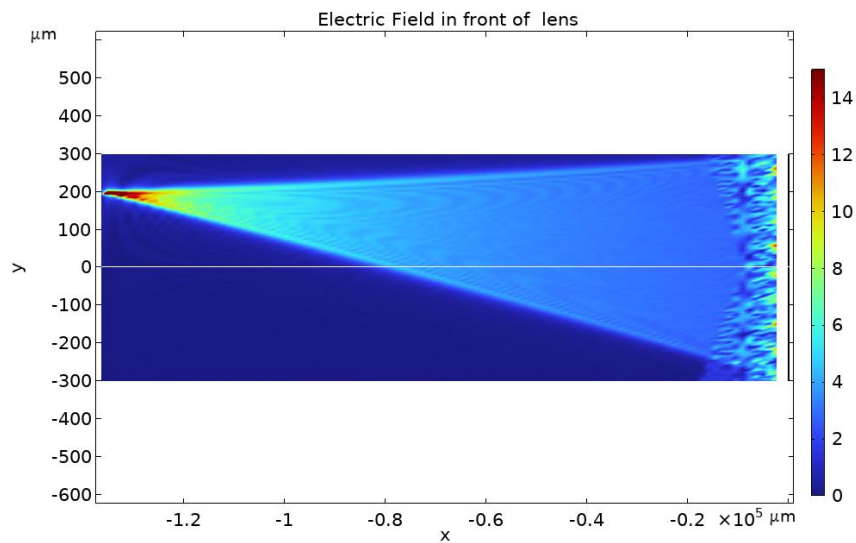


Рис.02

Это поле излучения точечного источника, **попадающее** на линзу.

Та часть излучения точечного источника, которая не попадает на линзу, не рассматривается и окрашена в темный цвет. Точечный источник находится от линзы слева на расстоянии  $d = 136.36 \text{ mm}$ . Точечный источник смещен вверх от оптической оси (белая линия) на расстояние  $y_1 = 200 \text{ mkm}$ .

\_ Посмотрим распределение поля во входной плоскости линзы. Нажимаем в окне Model Builder кнопку Field Plot Zero.

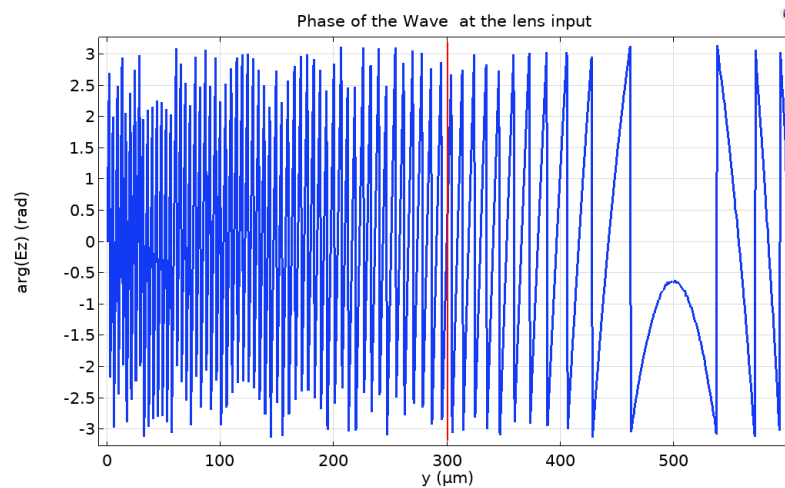


Рис.03

Это распределение фазы волны, падающей на линзу в передней плоскости линзы. Красная линия – положение оптической оси.

На рисунке график фазы изображен в форме, где фаза  $\varphi(x)$  является аргументом комплексного числа, и аргумент лежит в интервале  $-\pi < \varphi(x) < \pi$ . Поэтому, если развернуть график в вертикальном направлении, то можно увидеть, что зависимость фазы падающей волны от поперечной координаты  $x$  имеет параболическую зависимость, **перевернутая парабола**. Это означает, что фронт волны на входе в линзу соответствует фронту **расходящейся сферической волны**, вышедший из точечного источника.

\_ Посмотрим распределение поля на выходе из линзы. Нажимаем в окне Model Builder кнопку Near Field.

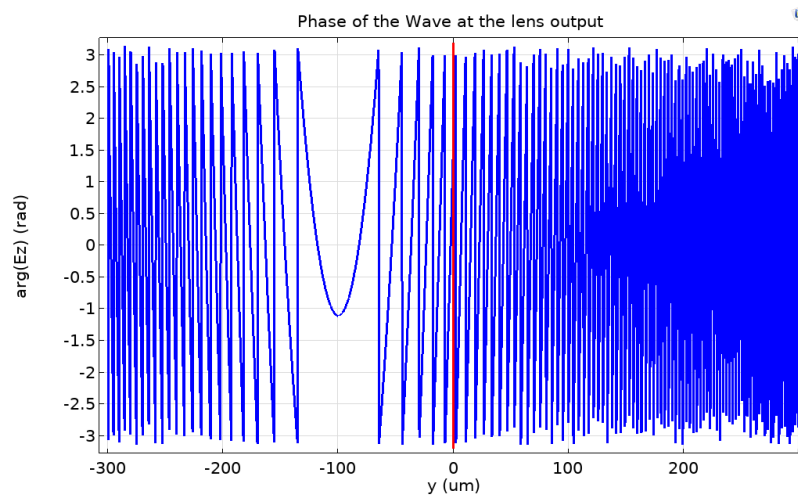


Рис.04

Это распределение фазы волны в плоскости, на выходе из линзы. Красная линия – положение оптической оси.

На рисунке график фазы изображен в форме, где фаза  $\varphi(x)$  является аргументом комплексного числа, и аргумент лежит в интервале  $-\pi < \varphi(x) < \pi$ . Поэтому, если развернуть график в вертикальном направлении, то можно увидеть, что зависимость фазы волны на выходе из линзы от поперечной координаты  $x$  имеет параболическую зависимость, **неперевернутая обычная парабола**. Это означает, что фронт волны на

выходе из линзы преобразуется во фронт **сходящейся сферической волны**, сходящейся в точку изображения точечного источника.

\_ Посмотрим поле излучения, прошедшего через линзу. Нажимаем в окне Model Builder кнопку Electric Field behind lens.

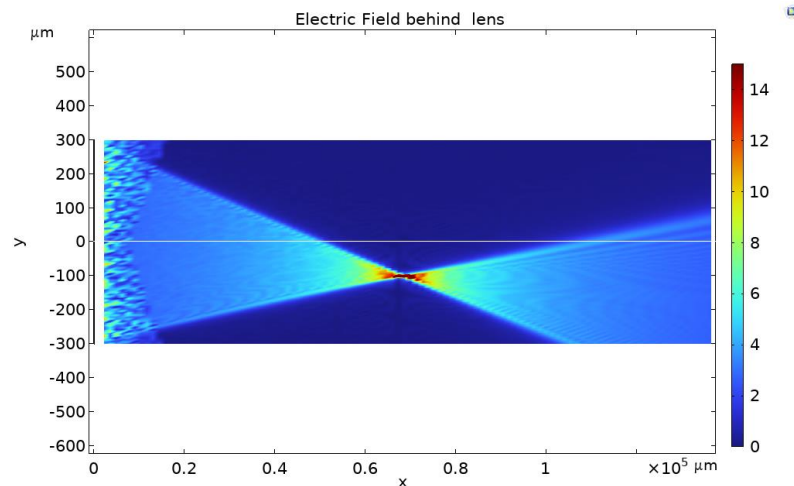


Рис.05

Излучение, прошедшее через линзу, создает изображение точечного источника справа от линзы на расстоянии  $f = 68.182 \text{ mm}$ . Изображение смещено вниз от оптической оси (белая линия) на расстояние  $y_2 = 100 \text{ mkm}$ .

### **Создание графического файла, содержащего результаты моделирования.**

В окне Graphics нажимаем кнопку Image Snapshot, и создаем графический файл с расширением png.

\_ Посмотрим распределение интенсивности поля в плоскости изображения. Нажимаем в окне Model Builder кнопку Image Plane.

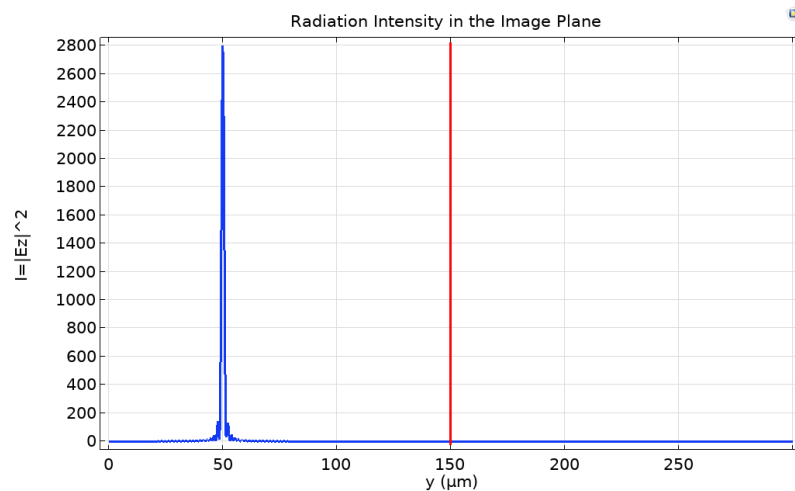


Рис.06

Показано сфокусированное изображение точечного источника в плоскости изображения. Красная линия – положение оптической оси.

\_ Посмотрим некоторые детали структуры линзы. В окне Model Builder раскрываем Component и нажимаем кнопку Geometry. Если структура не открылась, то тогда в окне Graphics нажимаем кнопку Go to Default View > Go to View 1, затем нажимаем кнопку Zoom Extents.

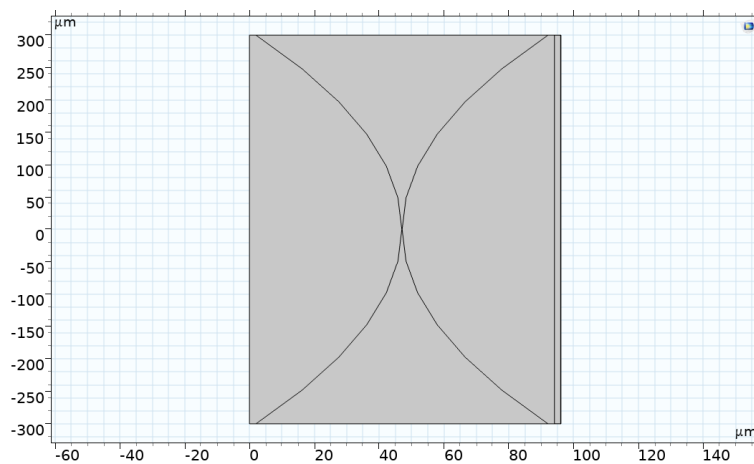


Рис.07



Посмотрим, где на этой структуре находятся области с бериллием, а где с воздухом. В окне Model Builder раскрываем окно Definition, нажимаем кнопку Variables 1.

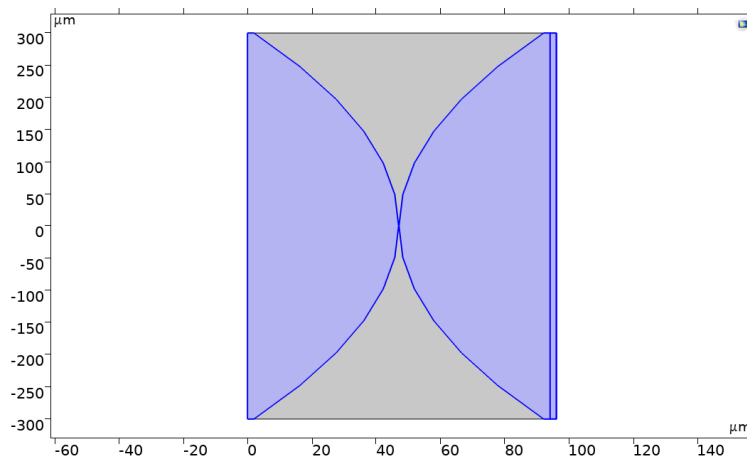


Рис.08

Сиреневый цвет, это область занятая воздухом. Нажимаем кнопку Variables 2.

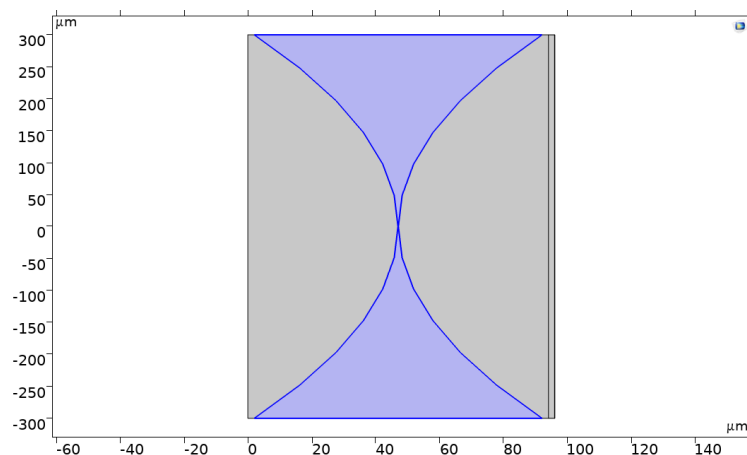


Рис.09

Здесь сиреневый цвет, это область занятая бериллием.

Можно эти области выделить еще двумя способами.

Первый способ, в окне Model Builder раскрываем окно Definition, раскрываем окно Selection, нажимаем кнопку Air или Lens.

Второй способ, в окне Model Builder раскрываем окно Materials, нажимаем кнопку Air или Beryllium.

Покажем входную плоскость линзы. Откроем фигуру Рис.07, в окне Model Builder раскрываем окно Definition, раскрываем окно Selection, нажимаем кнопку Input Boundary.

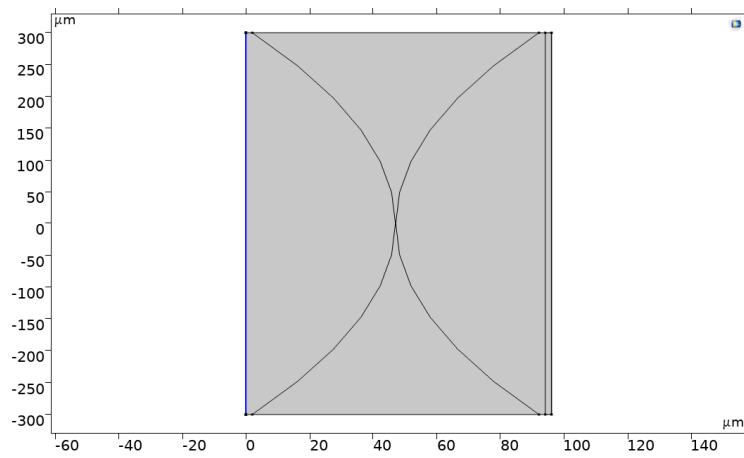


Рис.10

Вертикальная сиреневая линия слева это входная плоскость линзы. В окне Model Builder раскрываем окно Definition, раскрываем окно Selection, нажимаем кнопку Near Field.

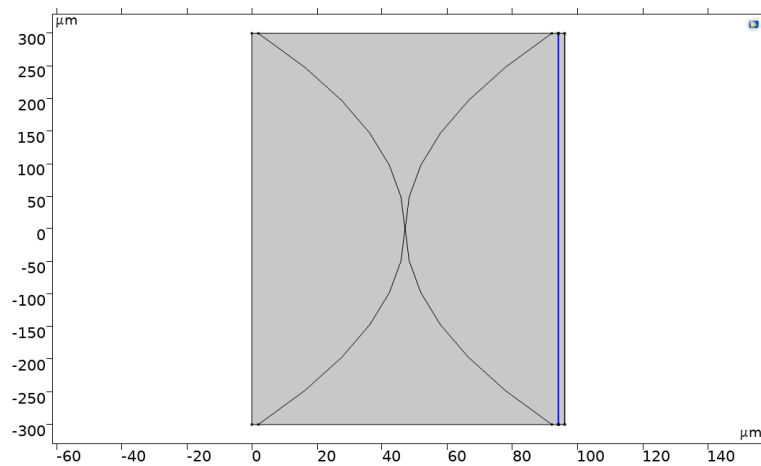


Рис.11

Вертикальная сиреневая линия справа это выходная плоскость линзы.

\_ Рассмотрим параметры линзы. В окне Model Builder нажимаем кнопку Parameters.

Label: Parameters 1

Parameters

Name	Expression	Value	Description
wl	13.5[nm]	1.35E-8 m	Wavelength
k	$2\pi/\text{wl}$	4.6542E8 1/m	Wave number
delt	0.011	0.011	Delta
g_lens	0.00	0	Gamma
n_lens	1-delt	0.989	Refractive index of lens
H	600[um]	6E-4 m	Diametr of lens
R	1[mm]	0.001 m	Lens radius of curvature
d	100[nm]	1E-7 m	thickness of the narrow p...
W_air	2[um]	2E-6 m	Air domain size
W_lens	$H^2/4/R + d + 2*W_{\text{air}}$	9.41E-5 m	Lens thickness
p1	W_lens	9.41E-5 m	Lens thickness double
n_AR	$\sqrt{n_{\text{lens}}}$	0.99448	non-reflective coating
d_AR	$\text{wl}/4/n_{\text{AR}}$	3.3937E-9 m	non-reflective coating
F1	$R/2/\text{delt}$	0.045455 m	focal length of 1 lens
N	1	1	number of lenses
FN	$F1/N$	0.045455 m	focal length of N lens
dOb	$3*FN$	0.13636 m	distance to object
flm	$dOb/2$	0.068182 m	image distance
fi	0.1	0.1	paraxial angle (degrees)
y0	200[um]	2E-4 m	lateral shift of the object

Рис.12

В этой таблице имеем параметры задачи.

\_ wl – длина волны в нм,

\_ k – волновое число,

\_ delt – дельта,

\_ g\_lens – гамма,

\_ n\_lens – действительная часть показателя преломления,

\_ H – диаметр линзы в мкм,

\_ R – радиус кривизны линзы в мм,

\_ d - толщина линзы в центральной части в нм,

\_ W\_air – толщина прямоугольной области позади линзы в мкм,

\_ W\_lens, p1 – толщина линзы,

\_  $n_{Ar}$ ,  $d_{Ar}$  – параметры без-отражательного покрытия на преломляющих поверхностях линзы,

\_  $F1$  – фокусное расстояние одной линзы,

\_  $N$  – число линз,

\_  $FN$  – фокусное расстояние  $N$  линз,

\_  $dOb$  – расстояние от объекта до линзы,

\_  $fIm$  – расстояние от линзы до изображения,

\_  $f_i$  – угол наклона параксиальных лучей к оптической оси в градусах,

\_  $y0$  – поперечный сдвиг объекта от оптической оси в мкм.

### **Изменение параметров линзы.**

Посмотрим, как можно изменить параметры линзы, и что надо проверить, прежде чем запускать Comsol на моделирование.

\_ Рассмотрим другую волну рентгеновского излучения  $\lambda = 16 \text{ nm}$ . Для бериллия коэффициент преломления будет равен  $\delta = 0.022$ .

\_ Увеличим диаметр линзы  $H = 1000 \text{ mkm}$ .

\_ Увеличим радиус кривизны преломляющей поверхности линзы  $R = 3 \text{ mm}$ .

\_ Поперечный коэффициент увеличения уменьшим  $\Gamma = \frac{1}{4}$ .

Оценим фокусное расстояние по формуле.

$$F = \frac{R}{2\delta} = \frac{3}{2 \cdot 0.022} = 68.18 \text{ mm}$$

По формуле линзы найдем расстояния от предмета до линзы и расстояние от линзы до изображения.

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad \Gamma = \frac{f}{d}, \quad d = 5F, \quad f = \frac{d}{4}$$

Таким образом имеем величины  $d = 340.9 \text{ mm}$ ,  $f = 85.23 \text{ mm}$ .

Открываем файл Be\_13\_5\_Point\_1.mph и даем ему другое имя Be\_16\_0\_Point\_1.mph.

\_ В окне Model Builder нажимаем кнопку Parameters, и изменяем нужные параметры.

\_ w1 16.0[nm]

\_ delt 0.022

\_ H 1000[um]

\_ R 3[mm]

\_ dOb 5\*FN

\_ fIm dOb/4

\_ Создаем новую геометрию линзы. В окне Model Builder раскрываем Component и нажимаем кнопку Geometry. Если структура не открылась, то тогда в окне Graphics нажимаем кнопку Go to Default View > Go to View 1, затем нажимаем кнопку Zoom Extents.

\_ В окне Settings Geometry нажимаем кнопку Build All. В окне Graphics появляется новая структура, если она не полностью помещается в окне, то нажимаем кнопку Zoom Extents.

\_ **Проводим проверку, созданной структуры.** В окне Model Builder раскрываем окно Definition, нажимаем кнопку Variables 1. Должна получиться картина, подобная Рис.08. При нажатии кнопки Variables 2, должна получиться картина, подобная Рис.09.

\_ В окне Model Builder раскрываем окно Definition, раскрываем окно Selection, нажимаем кнопку Air или Lens. Должны получиться картины подобные Рис.08, Рис.09.

\_ В окне Model Builder раскрываем окно Definition, раскрываем окно Selection, нажимаем кнопку Near Field или Input Boundary. Должны получиться картины подобные Рис.11, Рис.10.

\_ В окне Model Builder раскрываем окно Materials, нажимаем кнопку Air или Beryllium. Должны получиться картины подобные Рис.08, Рис.09.

\_ В окне Model Builder раскрываем окно Materials, нажимаем кнопку AR Coating. Появляется следующая картина.

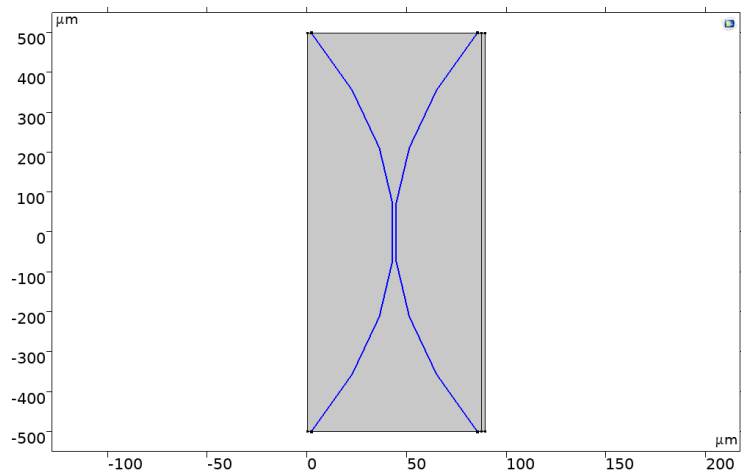


Рис.13

Сиреневые кривые, это преломляющие поверхности линзы, покрытые без-отражательным покрытием.

– **Проверяем настройку физических моделей** для решения поставленной задачи. В окне Model Builder раскрываем окно Electromagnetic Wave, Beam Envelops, нажимаем кнопку Matched Boundary Condition. Должны получиться картина подобная Рис.10.

– В окне Model Builder раскрываем окно Electromagnetic Wave, Beam Envelops, нажимаем кнопку Transition Boundary Condition. Должны получиться картина подобная Рис.13.

– **Строим сетку моделирования**, в главном меню Build Mesh.

– **Запускаем Comsol на моделирование**, в главном меню Build Compute.

**Замечание.** Оптическая ось – белая линия, и положение оптической оси – красная линия, были нарисованы после моделирования в графических редакторах Paint или Corel Photo Paint.

Результаты моделирования линзы с измененными параметрами показаны ниже.

