

Формирование бесселевых пучков наноразмерными порами в трековых мембранах

Р.М. Фещенко, А.В. Митрофанов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Ленинский проспект 53

В рентгеновской оптике широко применяются оптические элементы, формирующие рентгеновские микро- и наноразмерные пучки и обеспечивающие концентрацию излучения с существенным увеличением его интенсивности. Такие элементы (например, конические преломляющие линзы — рентгеновские аксиконы) могут трансформировать структуру поля исходного микро- или нано-пучка, преобразуя гауссов пучок в слаборасходящийся бесселев пучок [1].

Коническая форма аксиконов роднит их с коническими или биконическими порами в трековых мембранах, которые представляют собой пористые полимерные (например, полиэтилентерефталатные — ПЭТФ) пленки со стохастически расположенными сквозными порами различного диаметра и формы. Трековые мембраны изготавливаются путём травления полимерных плёнок, предварительно облучённых пучками тяжёлых ионов. В зависимости от условий травления скрытые ионные треки превращаются в сквозные поры в общем случае биконической (типа «песочных часов») или даже сигарообразной формы [2]. Пористые мембраны применяются в солнечной рентгеновской астрономии в мягкой области спектра для защиты детектора излучения от интенсивной фоновой засветки ультрафиолетовым, видимым или инфракрасным излучением Солнца, а также в качестве высокопрочных подложек для фильтров мягкого рентгеновского диапазона, устраняющих паразитную засветку в космических солнечных телескопах, и миниатюрных радиаторов для сброса тепла в вакууме.

Численное моделирование распространения излучения в пористых трековых мембранах часто осуществляется путём численного решения 3D параболического уравнения с помощью конечно-разностных схем с точными прозрачными граничными условиями [3]. Пример такого моделирования показан на Рис. 1, где изображена амплитуда поля рентгеновского излучения с длиной волны $\lambda=0.275$ нм, распространяющегося через биконическую пору в ПЭТФ мембране (рисунок сверху). В пространстве за порой заметно формирование бесселева пучка вблизи фокуса поры и кольцевого пучка в дальней зоне (график снизу). В данном случае биконическая пора работает как оптический аксикон, аналогично преломляющей линзе из работы [1], имеющей форму внеосевого параболоида.

Можно показать, что для формирования бесселева пучка необходимо, чтобы фокус поры располагался в ближней зоне поры. Для этого обратное число Френеля должно быть меньше единицы $\xi=\lambda/(2\delta L)<1$, где δ — декремент показателя преломления и L — длина поры. То есть, чем длиннее пора, тем лучше она работает как аксикон. Из ре-

зультатов проведённого численного моделирования также следует, что измерение параметров бесселева пучка в ближней зоне, углового диаметра и ширины кольцевой структуры поля в дальней зоне (даже при освещении мембраны плоской волной) позволяет определить диаметр калиброванных пор, а также отношение диаметра пор к их длине.

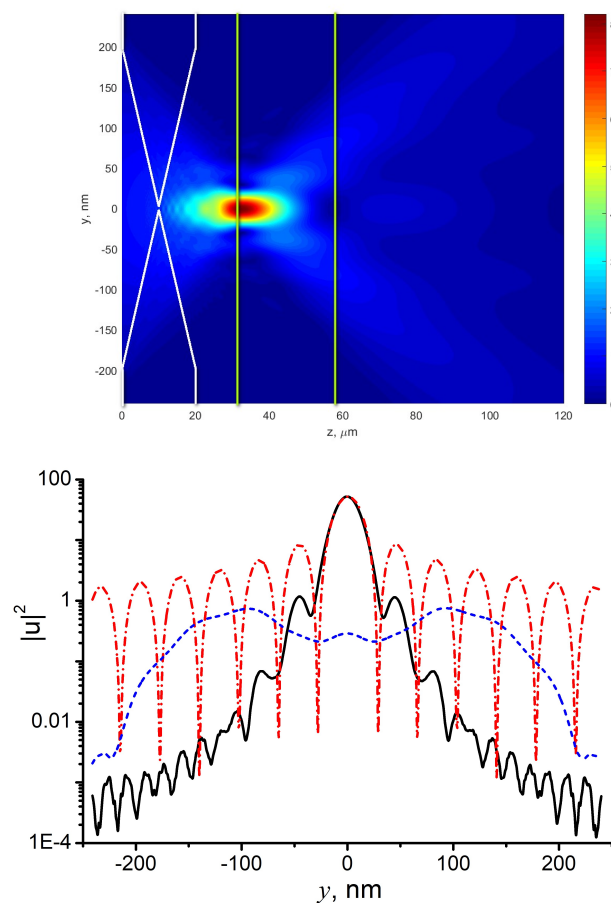


Рис. 1. Распространение рентгеновского излучения в биконической поре в ПЭТФ мембране при нормальном падении гауссова пучка на мембрану. Верху показано распределение $|u|$ в плоскости (y,z) . Цветовая шкала дана справа. Белые линии — границы стенок поры с входным диаметром 400 нм и длиной 20 мкм. Снизу показано распределение $|u|^2$ при $z=29.6$ мкм (черная сплошная линия) и его расчёт по формуле (4) из [1] (штрихпунктирная красная линия), а также распределение $|u|^2$ в дальней зоне при $z=66.0$ мкм (синяя пунктирная линия). Положения срезов обозначены вертикальными зелёными линиями.

1. Zverev D. *et al.* Optics Express, 2017, 25(23), 28469–28477.
2. Apel P. Y. *et al.* Journal of Membrane Science, 2006, 282, 393–400.
3. Митрофанов А. В., Фещенко Р. М. ЖТФ, 2023, 93(7), 948–952.