

Дифракционная эффективность среднечастотных решеток с малыми углами блеска для нежного рентгена

Л.И. Горай^{1,2,3}, Т.Н. Березовская¹, Н.А. Костромин^{1,2}, Д.В. Мохов^{1,2}, К.Ю. Шубина¹, Е.В. Пирогов¹, Н.Д. Прасолов⁴, А.Д. Буравлев^{1,2,4}

¹ Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 19702, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт аналитического приборостроения РАН, 198095, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия

Спектральная область «нежного рентгена» (tender X-ray) – жесткой части мягкого рентгена – на сегодня является наиболее интересной и, одновременно, сложной для спектроскопических исследований. Расширенный до октавы диапазон длин волн составляет, примерно, $\lambda = 0,15\text{--}1,2$ нм и охватывает К- и L-края поглощения важнейших легких и тяжелых элементов [1]. Эта область науки, в значительной степени не изучена из-за дефицита специализированных установок и составляющих их сложных элементов. Общеизвестно также, что высокочастотные дифракционные решетки «с блеском» (с треугольным профилем штрихов), как покрытые благородным металлом, так и многослойные, являются лучшим выбором с точки зрения достижения максимальной абсолютной эффективности η и разрешения в этом диапазоне спектра, особенно для резонансного неупругого рентгеновского рассеяния (RIXS) [2].

Решетки с блеском имеют, как минимум, вдвое большую эффективность по сравнению с аналогичными ламельными и синусоидальными решетками, а в высоких порядках дифракции они незаменимы. К среднечастотным решеткам обычно относят решетки, имеющие период d около одного-двух микрон. Подобные решетки могут изготавливаться с помощью прямой лазерной литографии и анизотропного жидкостного травления монокристаллических пластин Si, вырезанных под определенным углом [3]. В данной работе мы исследуем дифракционные свойства среднечастотных решеток с минимальными углами блеска ($\alpha = 0,5^\circ\text{--}2^\circ$), достижимыми с применением указанной технологии. Исследуемые нами решетки сравнимы или, даже, превосходят по разрешению высокочастотные решетки, так как они могут «блестеть» в выбранном диапазоне в высоких порядках дифракции, благодаря высокому качеству штрихов треугольной формы, в т.ч. у получаемых реплик. Применение покрытия из Pt дает более высокие, по сравнению с Au, коэффициенты отражения при слабом рассеянии и оно, по сравнению с многослойными покрытиями, позволяет использовать одну и ту же решетку как в классической (in-plane), так и в конической (off-plane) схеме дифракции в широком диапазоне длин волн нежного рентгена и за его пределами. Для достижения высокой дисперсии и разрешения и, одновременно, максимальной η в жестком рентгене предпочтительнее использовать решетки, работающие в схеме конической дифракции и не имеющие ограничений на максимальную частоту и глубину штрихов.

На рис. 1 представлены зависимости η для $\lambda = 1,2$

нм в ТЕ поляризации и двух типов схем Pt решеток с $d = 1,2$ мкм: классической, с $\alpha = 0,5^\circ$, от полярного угла падения; конической, с $\alpha = 2^\circ$, от азимутального угла падения (полярный равен 0). Как следует из приведенных графиков, в максимуме классической дифракции $\eta(-1) > 0,23$ и эффективность превышает 20% в широком диапазоне углов падения. В конической дифракции, $\eta(-3) > 0,61$ и имеет выраженный максимум вблизи угла падения $87,55^\circ$. Однако, в широком диапазоне углов падения, от $87,1^\circ$ до 88° , эффективность в конической схеме превышает максимальную эффективность в классической дифракции, достигаемую при угле падения $87,775^\circ$. Аналогичная ситуация наблюдается для $\lambda < 1,2$ нм при различных d и α . При этом, η в диапазоне $\lambda = 0,2\text{--}1,2$ нм не опускается в максимуме ниже $\sim 10\%$ для классической схемы и ниже $\sim 60\%$ – для конической.

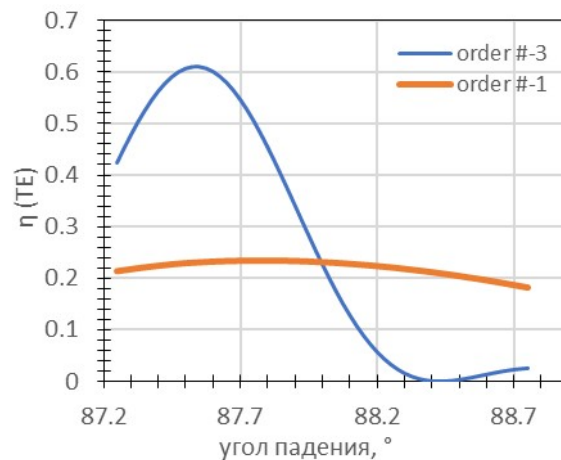


Рис. 1. Эффективность $\eta(\#)$ для $\lambda = 1,2$ нм в ТЕ поляризации и типа установки Pt решеток с $d = 1,2$ мкм: классической, с $\alpha = 0,5^\circ$, от полярного угла падения; конической, с $\alpha = 2^\circ$, от азимутального угла падения.

1. D. Attwood. Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications. Cambridge University Press, 1999.
2. K.V. Nikolaev, L.I. Goray, P.S. Savchenkov, A. V. Rogachev, A.A. Chouprik, T.N. Berезовская, D.V. Mokhov, S.A. Garakhin, N.I. Chkhalo, A.D. Bouravlev, and S.N. Yakunin. J. Appl. Cryst., 2026, 59, 737–750.
3. Л.И. Горай, Д.В. Мохов, Т.Н. Березовская, К.Ю. Шубина, Н.А. Костромин, Е.В. Пирогов, Н.Д. Прасолов, К.В. Николаев, Г.В. Пруцков, А.В. Рогачев, С.А. Гарахин, Н.И. Чхало, С.Н. Якунин, А.Д. Буравлев. ЖТФ, 2026, принята в печать.