

Исследование влияния технологий глубокого анизотропного травления кремния на качество планарной рентгеновской оптики

М.Н. Сороковиков^{1*}, Д.А. Зверев¹, И.И. Лятун¹, А.А. Баранников¹, М.А. Воеводина¹,
В.А. Юнкин^{2,3}, А.В. Мяконых², К.В. Руденко², А.А. Снигирёв¹

¹ Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта, Калининград, 236041 Россия

² Отделение физико-технологических исследований имени К.А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт»,
Москва, 117218 Россия

³ Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (ИПТМ),
Черноголовка, 142432 Россия

Кремниевая планарная оптика находит широкое применение в системах формирования и транспорта пучков рентгеновского излучения [1, 2]. Эффективность применения элементов рентгеновской оптики определяется точностью формирования их геометрических параметров и шероховатостью рабочих поверхностей. При этом требования к качеству поверхности существенно различаются для элементов, работающих на физических принципах преломления и отражения. Для составных преломляющих линз (СПЛ) ключевым фактором является точность воспроизведения параболического профиля, тогда как для зеркальной оптики скользящего падения определяющим параметром становится шероховатость отражающих поверхностей. Различие требований к отражающим оптическим элементам обуславливает необходимость комплексного анализа, сочетающего несколько взаимодополняющих методов исследования. В настоящей работе представлены результаты исследования основных геометрических параметров и шероховатости поверхности кремниевых планарных оптических элементов, изготовленных с использованием Bosch-процесса [3] и криогенного плазмохимического травления [4].

Геометрические параметры кремниевых планарных СПЛ исследованы методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Измеренные значения физической апертуры $A=10.1$ мкм, расстояния между апексами парабол $b=1.9$ мкм и длины линзы $2l=20$ мкм соответствуют проектным, подтверждая воспроизведение заданных геометрических параметров элементов. Для оценки точности формирования параболического профиля использовалась методика цифровой обработки СЭМ-изображений, основанная на автоматическом выделении контура линзы, аппроксимации методом наименьших квадратов, коррекции ориентации изображения и статистической оценке погрешностей [5]. Полученные значения радиуса кривизны в области апекса $R=1.24$ мкм подтверждают точность воспроизведения проектного параболического профиля.

Шероховатость рабочих поверхностей исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на продольных сколах тестовых структур. Bosch-процесс формирует регулярную волнообразную поверхность с периодом 345 нм и амплитудой 15 нм со среднеквадратичной шероховатостью 6.5 нм, тогда как криогенное плазмохимическое травление полностью исключает регулярную структуру и обеспечивает снижение значения до 3.6 нм (область сканиро-

вания 2×2 мкм). На основании полученных данных АСМ была выполнена оценка отражательной способности поверхностей [6] при энергии излучения $E=9.25$ кэВ и угле скольжения $\theta=0.11^\circ$. Показано, что увеличение среднеквадратичной шероховатости >5 нм приводит к снижению эффективности зеркальной рентгеновской оптики скользящего падения.

Исследование влияния технологий изготовления на качество отражающих поверхностей тестовых структур в виде каналов (период $p=10$ мкм, ширина $d=5$ мкм) проводилось с использованием высокочувствительного интерференционного метода. Эксперимент был выполнен на лабораторном рентгеновском источнике *MetalJet* при энергии $E=9.25$ кэВ (GaK_α линия). Регистрация интерференционных картин осуществлялась CCD камерой с размером пикселя 0.55 мкм на расстоянии Тальбота $z=0.74$ м. Характеризация полученных интерференционных картин выполнялась по параметру видности $V=(I_{\max}-I_{\min})/(I_{\max}+I_{\min})$. Видность интерференционных картин для структур, изготовленных Bosch-процессом и криогенным травлением, составила $V_{\text{Bosch}}=20\%$ и $V_{\text{Cryo}}=10\%$ соответственно. Дополнительно в режиме асимметричного освещения исследовалась локальная область *Ступо*-структуры, что способствовало увеличению видности V_{Cryo} до 25%.

Результаты комплексного исследования демонстрируют соответствие основных геометрических параметров проектным значениям. При этом криогенное травление позволяет получать поверхности с более низкой локальной шероховатостью, что имеет принципиальное значение для элементов кремниевой планарной рентгеновской оптики, эффективность которых определяется минимизацией рассеяния в методах фазового контраста и когерентной дифракционной визуализации.

1. A. Snigirev, I. Snigireva, M. Grigoriev, et al. Advances in X-Ray/EUV Optics and Components II 6705, 670506, (2007).
2. D. Zverev, I. Snigireva, M. Sorokovikov, Opt. Express 29(22), 35038 (2021).
3. F. Laermer and A. Schilp, U.S. Patent No. 5,501,893, Mar. 03, (1996).
4. T. Tillocher, R. Dussart, L. J. Overzet, et al. J. Electrochem. Soc., vol. 155, D187, (2008).
5. A. Narikovich, D. Zverev, I. Snigireva, A. Snigirev, et al. AIP Conf. Proc. 2299, 060006 (2020).
6. L. Nénot, P. Croce, Rev. Phys. Appl. 15(3), 761-779, (1980).