

Рентгеновская рефлекто-интерферометрия на основе преломляющих рентгеновских линз

С. Лятун¹, И.Лятун¹, Д.Зверев¹, И. Снигирева², А.Снигирев¹

¹ Международным научно-исследовательский центр

“Когерентная рентгеновская оптика для установок Мегасайенс”,

Балтийский Федеральный Университет имени Иммануила Канта, 236041 Калининград, Россия

² ESRF, Европейский Центр Синхротронного Излучения, Гренобль, Франция

В работе продемонстрированы возможности метода рентгеновской рефлекто-интерферометрии (РРИ) на основе составных преломляющих линз (СПЛ). Физическая основа метода - зондирование исследуемой структуры сходящимся когерентным рентгеновским пучком, формируемым составными преломляющими линзами [1, 2]. Сфокусированный пучок содержит в себе непрерывный диапазон углов падения и отражаясь от структуры образца формирует двумерное распределение интенсивности, содержащее интерференционные полосы (осцилляции Киссига) [3]. Данный подход расширяет возможности классического метода рентгеновской рефлектометрии благодаря одновременной регистрации двумерного (2D) интерференционного распределения интенсивности без необходимости углового сканирования [4]. Анализ полос позволяет определять толщины исследуемых слоев и регистрировать их изменения.

Метод РРИ обладает ключевыми достоинствами по сравнению со стандартной схемой θ -2 θ сканирования [2]:

- **отсутствие сканирования:** угловая характеристика отражения от структуры фиксируется в рамках одной двумерной интерференционной картины, которая определяется числовой апертурой оптики. Такой подход исключает необходимость сканирования образцом и/или детектором;

- **субмикронное пространственное разрешение:** использование СПЛ с высокой числовой апертурой позволяет локализовать сфокусированный пучок на поверхности образца в пределах до ~100 нанометров;

- **высокое временное разрешение:** применение современных источников синхротронного излучения (СИ) в сочетании с высокочувствительными 2D-детекторами позволяет сократить время экспозиции до единиц миллисекунд. Это открывает перспективы для экспресс-анализа быстропотекающих процессов и проведения экспериментов *in situ*.

Возможности метода РРИ были экспериментально продемонстрированы на источнике синхротронного излучения в широком энергетическом диапазоне от 10 до 25 кэВ. В качестве исследуемых образцов были выбраны тестовые структуры - свободновисящие мембраны нитрида кремния (Si_3N_4) различной толщины (от 200 до 1000 нм). В результате проведенных экспериментов была получена и проанализирована серия интерференционных картин [2,5].

Метод РРИ открывает широкие перспективы для экспресс-анализа тонкопленочных и многослойных систем с использованием когерентного синхротронного излучения [2]. Использование комбинаций и объединения 2D и 1D преломляющей оптики позволяет существенно расширить и оптимизировать метод РРИ для решения различных экспериментальных задач, включая возможность управления пространственным разрешением и плотностью потока излучения при выполнении исследований тонкопленочных структур. Благодаря фокусирующим свойствам составных преломляющих линз открываются новые перспективы исследований как в области физики твердого тела, так и в области материаловедения и биологических приложений, а также для проведения промышленных исследований с принципиально новым пространственным и временным разрешением.

1. A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler. *Nature*, (1996), 384, 49.
2. S. Lyatun, D. Zverev, P. Ershov, I. Lyatun, O. Konovalov, I. Snigireva, A. Snigirev. *Journal of Synchrotron Radiation*, (2019), 26, 1599–1606.
3. H. Kiessig. *Annalen der Physik*, (1931), 402, 769–788.
4. M. Krumrey, L. Cibik, A. Fischer, A. Gottwald, U. Kroth, F. Scholze. *PTB-Mitteilungen*, (2014), 124, 35.
5. Lyatun, S., Lyatun, I., Zverev, D., Konovalov, O., Snigireva, I., & Snigirev, A. (2020). In *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XV* (Vol. 11491, pp. 57-65). SPIE.