

# Неразрушающий анализ наноструктур методом рентгеновской птихографии: состояние и перспективы

В.П. Дорофеев<sup>1</sup>, В.Г. Криштоп<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"

117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1

<sup>2</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук  
142432, Россия, Черноголовка, ул. Осипьяна, 6

С уменьшением размеров транзисторов ниже 7 нм традиционные методы метрологии полупроводников — сканирующая (SEM) и просвечивающая (TEM) электронная микроскопия — сталкиваются с фундаментальными ограничениями: разрушающим характером пробоподготовки, поверхностной чувствительностью и невозможностью получения полной 3D-картины внутренней структуры чипа. Рентгеновская птихография, как безлинзовый метод когерентной дифракционной визуализации, предлагает уникальное сочетание проникающей способности жёсткого рентгенового излучения и разрешения на уровне единиц нанометров.

В птихографии образец последовательно освещается перекрывающимися участками когерентного рентгенового пучка. Регистрируемые в дальней зоне дифракционные картины содержат информацию об амплитуде и фазе рассеянного излучения. Используя избыточность данных от перекрывающихся областей, итерационные алгоритмы восстановления фазы реконструируют комплексную функцию пропускания образца с разрешением, определяемым максимальным углом регистрации рассеяния (числовой апертурой детектора), а не качеством оптики. Для получения 3D-изображения птихография комбинируется с томографией (РХСТ) или ламинографией (РyXL), что позволяет анализировать полные, неразрезанные кристаллы.

Ключевые достижения последних лет включают демонстрацию птихографической томографии с изотропным разрешением 16 нм на процессоре Intel [1], развитие птихографической ламинографии для плоских чипов с разрешением 18,9 нм [2], а также рекордное разрешение 4 нм, достигнутое методом импульсной птихографии (burst ptychography) на коммерческом логическом чипе 7-нм узла [3]. Метод импульсной птихографии использует серию коротких измерений («вспышек»), эффективно «замораживающих» движение образца, с последующей вычислительной коррекцией дрейфа. Это обеспечило 170-кратное увеличение скорости сбора данных и 10-кратное увеличение глубины поля зрения. Однако, несмотря на ускорение, абсолютное время сканирования одного чипа всё ещё исчисляется часами, что пока позиционирует метод как инструмент углублённого офлайн анализа, а не поточного контроля.

Практические приложения для разработчиков чипов включают:

1. Инспекцию масок EUV-литографии: актиничное измерение на рабочей длине волны (13,5 нм) с возможностью количественной оценки фазовых сдвигов в поглощающих слоях и поиска скрытых дефектов под мультислоем.

2. Анализ дефектов: обнаружение скрытых дефектов в многоуровневых 3D-архитектурах (пустоты в TSV, электромиграция в интерконнектах). Метод обеспечивает превосходный контраст для тяжёлых металлов (Cu, W, Ru, Co), однако визуализация границ между лёгкими элементами (Si, O, C, N) в современных high-k/low-k стеках остаётся сложной задачей из-за малой разницы в показателях преломления.

3. Аппаратная безопасность: верификацию проектирования через неразрушающую томографию полного чипа с последующим послойным сравнением с проектным GDS-файлом для поиска «аппаратных троянов».

4. Анализ напряжений: картирование деформаций в кристаллической решётке методом Брэгг-птихографии.

Ключевые вызовы на пути к широкому внедрению связаны с необходимостью синхротронных источников (когерентный поток существующих лабораторных источников пока недостаточен для суб-5 нм разрешения), высокой вычислительной сложностью реконструкции и строгими требованиями к подготовке образцов. Особую проблему представляет радиационное повреждение: жёсткий рентген вызывает деградацию пористых low-k диэлектриков, что требует применения криогенного охлаждения образцов или оптимизации дозовой нагрузки.

Перспективные направления включают развитие алгоритмов на базе ИИ и GPU-ускорение, проведение in-situ измерений под воздействием напряжения/температуры и создание специализированных установок для фабрик. В долгосрочной перспективе интеграция птихографии в производственные линии (in-line metrology) станет возможной по мере появления компактных источников когерентного излучения высокой яркости (DLSR, лазерные плазменные источники).

1. M. Holler et al., Nature, 2017, 543. 7645. 402-406.
2. M. Holler et al., Nature Electronics, 2019, 2, 10, 464-470.
3. T. Aidukas et al., Nature, 2024, 632. 8023, 81-88.