

**Выписка из решения секции №3 Ученого Совета  
НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ о подаче цикла работ  
по теме: «Разработка атомно-зондового томографа ПАЗЛ-3D с фемтосекундным  
лазерным испарением», авторов: Рогожкин С.В., Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов  
А.С., Никитин А.А., Алеев А.А., Хомич А.А., Н.А. Искандаров, Хорошилов В.В.,  
Корчуганова О.А., по разделу «Лучшая работа по созданию установок и развитию  
методов эксперимента».  
Протокол № 1 от 24.02.2021 г.**

**Краткая аннотация работ**

Атомно-зондовая томография является одним из наиболее эффективных прямых методов определения пространственных распределений химических элементов в различных материалах. Контроль трехмерного распределения химических элементов с точностью, близкой к нескольким ангстремам актуален для разработки новых конструкционных материалов. В России атомно-зондовые исследования проводятся только в организациях НИЦ «Курчатовский институт». Значительная часть этих исследований посвящена изучению наноструктуры реакторных материалов. Поскольку атомно-зондовый томограф с лазерным испарением наилучшим образом подходит для этих целей, то в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ был разработан, собран и запущен прототип атомно-зондового томографа с лазерным испарением (ПАЗЛ-3D).

Данный прибор является многокомпонентным, высокотехнологичным устройством, включающим вакуумные камеры, в которых поддерживается высокий и сверхвысокий вакуум, использующим современную быстродействующую детектирующую систему ионов, а также мощную лазерную систему с импульсами фемтосекундной длительности. В качестве детектирующей системы выбран детектор на основе линий задержки с точностью определения координат менее 100 мкм и временным разрешением менее 50 пс, поддерживающий скорость сбора данных до нескольких тыс. событий в секунду. Применена уникальная импульсная испаряющая лазерная система с длительностью импульса  $\approx 300$  фс и тремя гармониками 515 нм, 343 нм и 257 нм. Наличие разных гармоник позволяет оптимизировать условия испарения для металлов, полупроводников и диэлектриков. Для обеспечения высокого вакуума использовалась система из турбомолекулярных и спиральных форвакуумных насосов. Помимо разработки прибора, был создан уникальный комплекс программного обеспечения "КВАНТМ-3D", позволяющий расшифровывать и визуализировать данные, полученные на приборе ПАЗЛ-3D.

Тестирование работы установки и программного обеспечения обработки данных были проведены на чистых материалах - вольфраме и алюминии, а также ряде конструкционных сталей для ядерных реакторов. В результате было определено пространственное разрешение установки: латеральное разрешение примерно 2-4 Å, разрешение по глубине примерно 1-2 Å при исследовании металлических образцов. Разрешение по массе составило не менее 600 единиц на полувысоте. Проведена работа по оптимизации параметров установки и продемонстрирована точность определения химического состава до 0.06% на примере модельного сплава Fe-22%Cr.

В рамках разработки процедуры восстановления данных были оптимизированы базовые алгоритмы восстановления масс и координат. Для оптимизации базового алгоритма восстановления масс был разработан и апробирован комплексный алгоритм статистической

обработки данных на материале тестовых исследований сплавов железа-хрома, вольфрама, алюминия, и титан-молибден-циркония. По результатам разработки были получены существенные улучшения параметра разрешения по массе на восстанавливаемых масс-спектрах, с показателем не менее 100 единиц до оптимизации, вплоть до 1000 единиц (при исследовании сплавов алюминия) после ее проведения. Также, была разработана процедура автоматической коррекции масс для обеспечения теоретически верных положений основных пиков масс-спектра. В рамках работы по оптимизации базового алгоритма восстановления координат были реализованы прямопроекционные и стереографические варианты данного алгоритма, дополненные специальными процедурами, уточняющими местоположение атомов путем интерполяции параметров восстановления, функционально зависящих от напряжения на образце. По результатам работы были получены изображения кристаллографических структур, разрешенных в нескольких направлениях, что позволило измерить среднее значение пространственного разрешения, которое составило 2-4 Å.

### **Научная и практическая значимость. Оценка новизны результатов**

Разработана, запущена и апробирована установка Томографический Атомный Зонд ПАЗЛ-3D с фемтосекундной системой лазерного испарения атомов. Это единственная установка, разработанная и собранная в России. Данная установка использует лазерный тип испарения, что выгодно отличает её от установок с электрической системой испарения, поскольку позволяет исследовать не только проводники, но и полупроводники и диэлектрики. Также ПАЗЛ-3D использует программное обеспечение, полностью разработанное и реализованное в ИТЭФ. Разработаны уникальные методики проведения атомно-зондовых исследований на данной установке. Все вышеуказанные факты позволяют заключить, что разработка комплекса, включающего: систему сверхвысоковакуумных камер, систему лазерного испарения, высокого напряжения и криогенную систему, а также уникальное программное обеспечение позволило не только создать уникальную научную установку для России, но и получить беспрецедентный опыт разработки, запуска и эксплуатации комплекса одной из современных методик анализа материалов на практически атомарном уровне.

### **Творческий вклад авторов:**

Ф.И.О. автора	Творческий вклад
Рогожкин Сергей Васильевич	Руководство работой
Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов А.С., Никитин А.А., Алеев А.А., Хомич А.А., Н.А. Искандаров, Хорошилов В.В., Корчуганова О.А.	Исполнители работы. Разработка устройства установки, отработка отдельных элементов конструкции установки, тестирование собранной установки, разработка архитектуры программного обеспечения для управления установкой и обработки полученных данных, написание программных кодов, проведение пробных исследований и получение данных на различных материалах.

Секция №3 Ученого Совета рекомендует представленные материалы к выдвижению на конкурс научно-исследовательских работ ИТЭФ 2020 г. по разделу «Лучшая работа по созданию установок и развитию методов эксперимента». Результаты голосования: присутствовали – 6 чел., «за» - 6 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел.

Председатель секции №3 Ученого Совета,  
зам. директора НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ,  
доктор тех. наук

Т.В. Кулевой

Ученый секретарь секции №3  
кандидат физ.-мат. наук

М.М. Кац