ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП JEM-ARM300F2 – СВЕРХВЫСОКОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ И ВОЗМОЖНОСТЬ СУБАНГСТРЕМНОГО АНАЛИЗА

УДК 620.187.3
БАК 02.00.10

Джимбо Ю. (Jimbo Y.), Хашигучи Х. (Hashiguchi H.), Ониши И. (Ohnishi I.), JEOL Ltd.,
y.jimbo@jeol.co.jp
Перевод с английского: **Иванов С.А.,** Interactive Corporation

Фирма JEOL (Япония) разработала электронный микроскоп с корректором аберраций и ускоряющим напряжением до 300 кВ JEM-ARM300F2 (GRAND ARM 2). Новый полюсный наконечник объективной линзы FHP2 позволяет как получать изображения со сверхвысоким пространственным разрешением, так и проводить высокоточный рентгеновский субангстремный анализ в широком диапазоне ускоряющих напряжений. Защитный кожух микроскопа и улучшенная устойчивость к различным помехам обеспечивают более высокую, чем у предшествующей модели, электрическую и механическую стабильность. Это гарантирует независимость работы прибора от изменений окружающей среды и возможность достижения высоких рабочих характеристик в любом регионе мира. Новые автоматизированные функции дают возможность широкому кругу пользователей, от начинающих до экспертов, проводить анализ с атомарным разрешением. Ожидается, что новый микроскоп позволит исследовать образцы, ранее недоступные или сложные для анализа.

В последние годы прогресс в области коррекции аберраций значительно улучшил пространственное разрешение в просвечивающей электронной (ПЭМ) и растровой электронной (ПРЭМ) микроскопии. Достижение ангстремного и субангстремного разрешений стало обычным делом для ПЭМ с корректорами сферических аберраций. Помимо получения изображений с высоким разрешением, появилась возможность химического анализа на атомном уровне с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) и/или спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ).

В 2014 году фирма JEOL разработала электронный микроскоп JEM-ARM300F (GRAND ARM) с коррекцией аберраций и ускоряющим напряжением 300 кВ. Основой для него стали проект JST CREST R005 и JEM-ARM200F – первый коммерческий электронный микроскоп с коррекцией аберраций и ускоряющим напряжением 200 кВ. Концепция GRAND ARM предполагала достижение предельных характеристик для получения изображений сверхвысокого пространственного разрешения. В 2015 году в Токийском университете данный микроскоп достиг разрешения 45 пм в режиме ПРЭМ с использованием корректора сферических аберраций 3-го порядка ETA (Expanding Trajectory Aberration – корректор аберраций траекторий электронов) [2]. В 2017 году этот же микроскоп успешно достиг разрешения 40,5 пм при использовании корректора сферических аберраций 5-го порядка (дельта-корректора) [3]. В то время указанные результаты являлись рекордными для данного класса приборов, что

позволяло с полным основанием позиционировать GRAND ARM как "микроскоп с атомным разрешением".

Однако за последние несколько лет требования к микроскопам с коррекцией аберраций изменились. Исследователям необходим высокочувствительный прибор для химического анализа и визуализации с высоким пространственным разрешением в широком диапазоне ускоряющих напряжений, позволяющий исследовать не только твердые образцы, такие как полупроводниковые приборы, металл и керамика, но и мягкие материалы – углерод, полимеры, органические вещества. Кроме того, новая модель микроскопа с коррекцией аберраций должна была обладать высокой стабильностью конструкции, чтобы высокие рабочие характеристики сохранялись в любом месте установки независимо от условий окружающей среды, поскольку теперь такие приборы востребованы не только в Японии, странах Европы и США. Еще одно важное требование – простое и удобное управление микроскопом, чтобы с ним могли работать не только эксперты, но и начинающие пользователи. В результате в 2020 году фирма JEOL представила модель JEM-ARM300F2, или GRAND ARM 2 (рис.1).

GRAND ARM 2 отличается от предшественника новыми функциями и улучшенными рабочими характеристиками. Основные новшества:

- полюсный наконечник объективной линзы FHP2;
- экранирующий кожух и повышенная устойчивость к различным помехам;
- функции для упрощения управления микроскопом.

Рис.1. Электронный микроскоп сверхвысокого разрешения GRAND ARM 2

В настоящей статье мы расскажем об особенностях GRAND ARM 2 с акцентом на перечисленных трех направлениях новаций.

ПОЛЮСНЫЙ НАКОНЕЧНИК ОБЪЕКТИВНОЙ ЛИНЗЫ FHP2

Предыдущая модель, GRAND ARM, может быть оборудована одним из двух видов полюсных наконечников объективной линзы: WGP (Wide Gap Pole-piece – полюсный наконечник с широким зазором) и FHP (Full High resolution Pole-piece – полюсный наконечник для получения максимального разрешения).

WGP отличается широким межполюсным зазором и имеет форму, оптимизированную для использования кремниевое дрейфового детектора (SDD) с чувствительным кристаллом больших размеров. Благодаря уменьшению расстояния между образцом и SDD-детектором, микроскоп с WGP имеет повышенную чувствительность в режиме ЭДС с двумя беззональными SDD-детекторами с площадью кристаллов 100 или 158 мм². Общий угол сбора рентгеновских лучей сдвоенными SDD-детекторами достигает 1,6 стерadian при использовании SDD с площадью кристалла 100 мм² [4] и 2,2 стерadian при установке SDD с площадью кристалла 158 мм² [5]. GRAND ARM 2 с WGP позволяет выполнять рентгеновский анализ с ультравысокой чувствительностью. Кроме

Рис.2. Траектории излучения при применении полюсных наконечников FHP и FHP2

того, можно проводить различные эксперименты *in situ* с применением держателей образцов для нагрева, охлаждения, исследования в жидкости, газе и так далее, поскольку имеется достаточное пространство для размещения держателей большой толщины.

Полюсный наконечник FHP предназначен для получения изображений со сверхвысоким пространственным разрешением, поскольку он имеет очень малые коэффициенты сферической и хроматической аберрации. Как уже упоминалось выше, микроскоп с FHP может достигать разрешения 45 пм с корректором аберраций ETA [2] и 40,5 пм с дельта-корректором [3] в режиме ПРЭМ. Однако в конфигурации с FHP не удалось достигнуть высокой чувствительности ЭДС-анализа. Основная причина заключается в том, что магнитный зазор полюсного наконечника FHP слишком узок, чтобы избежать насыщения магнитного потока, а расстояние между образцом и SDD-детектором – больше, чем при использовании WGP. Эффективность детектирования рентгеновского излучения с полюсным наконечником FHP значительно ниже, чем с WGP, а угол сбора лучей составляет всего 0,7 стерadian даже при использовании сдвоенного SDD-детектора площадью 100 мм². Поэтому для GRAND ARM 2 был разработан новый полюсный наконечник объективной линзы FHP2, который обеспечивает возможность получения изображений со сверхвысоким пространственным разрешением при одновременном повышении чувствительности ЭДС-анализа (рис.2).

FHP2 имеет такую же ширину магнитного зазора, что и FHP, но форма зазора была оптимизирована для SDD-детектора большой площади. В результате с новым полюсным наконечником можно использовать сдвоенный SDD-детектор площадью 158 мм². Общий угол сбора рентгеновского излуче-

Рис.3. Сравнение интенсивностей детектируемого рентгеновского излучения К-серии для Ni от тонкопленочного образца NiO_x при использовании полюсных накопечников UHR, HR и FHP2. Ускоряющее напряжение – 200 кВ

ния для детекторов такого размера достигает 1,4стерадиан (0,7стерадиан для каждого SDD), что в два раза больше, чем в случае полюсного накопечника FHP со сдвоенным SDD площадью 100 мм² (0,7стерадиан), и близко к аналогичному показателю полюсного накопечника WGP со сдвоенным детектором площадью 100 мм² (1,6стерадиан). При этом большой угол возвышения пары детекторов – 26° – минимизирует эффекты затенения образца держателем для увеличения эффективности сбора рентгеновского излучения.

На рис.3 приведено сравнение интенсивностей собранного рентгеновского излучения К-серии для Ni от тонкой пленки NiO_x при использовании в одинаковых условиях трех разных конфигураций полюсных накопечников. Интенсивность рентгеновского излучения, детектированного с полюсным накопечником FHP2 и сдвоенным SDD-детектором площадью 158 мм², примерно в 1,4 раза выше, чем с полюсным накопечником предыдущего поколения UHR и сдвоенным SDD площадью 100 мм². В дополнение к высокой интенсивности детектируемого рентгеновского излучения применение FHP2 улучшает отношение пик/фон ЭДС-спектра, поскольку большой угол возвышения снижает эффект тормозного рентгеновского излучения. В ходе анализа тонких пленок NiO_x мы оценили величины системных пиков с точностью выше 0,5%: при применении накопечника FHP2 и сдвоенного SDD-детектора площадью 158 мм² отношение пик/фон (число Фиори) превысило 4000. Наряду с увеличением чувствительности ЭДС-анализа полюсный накопечник FHP2 позволяет получать сверхвысокое пространственное разрешение.

Рис.4. ПРЭМ-изображения в режиме HAADF и их фурье-образы для Si [111] (а, б) и GaN [211] (в, г), полученные с атомным разрешением на GRAND ARM 2 с полюсным накопечником FHP2 и корректором ETA при ускоряющем напряжении 300 кВ

На рис.4 показаны ПРЭМ-изображения монокристаллов Si [110] и GaN [211], полученные с атомным разрешением на микроскопе с полюсным накопечником FHP2 и корректором ETA при ускоряющем напряжении 300 кВ в режиме HAADF (High Angle Annular Dark Field – кольцевое темное поле при больших углах), а также приведены результаты обработки этих изображений с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ). На ПРЭМ-изображении в режиме HAADF (рис.4в) четко воспроизведена гантеля Ga-Ga с теоретическим расстоянием 63 пм между атомами Ga. После применения БПФ (рис.4г) различимы элементы с расстоянием между ними менее 50 пм.

На рис.5 показано ПРЭМ-изображение GaN [211], полученное при 300 кВ путем наложения 20 снимков в режиме HAADF, и результат его БПФ-обработки. В этом случае на фурье-образе различимы даже элементы с расстоянием между ними 45 пм. Приведенные результаты свидетельствуют, что по сравнению с FHP полюсный накопечник FHP2 обеспечивает такое же или даже более высокое пространственное разрешение.

Кроме того, конфигурация с FHP2 позволяет получать карты распределения элементов методом ЭДС на субнангстромном уровне, что ранее было затруднительно. На рис.6 приведены ПРЭМ-изображения GaN [211], полученные с атомным разрешением в режимах HAADF и ABF (кольцевое светлое поле), а также ЭДС-карта распределения элементов после обработки фильтром Винера. Применялся GRAND ARM 2 с FHP2 и сдвоенным SDD-детектором площадью 158 мм² при ускоряющем напряжении 300 кВ. Если

Просвечивающий электронный микроскоп JEM-ARM300F2 GRAND ARM™2

Оптимальное сочетание визуализации
со сверхвысоким атомным разрешением и лучшего в своем классе
элементного ЭДС-анализа с большим телесным углом

Изображение кристалла GaN (212), полученное в режиме сканирующего просвечивающего электронного микроскопа (STEM) с помощью темнопольного кольцевого детектора электронов, рассеянных под большими углами (HAADF): а – изображение (1 кадр), б – его образ после быстрого преобразования Фурье (БПФ), с – изображение после интеграции 20 кадров, д – его образ после БПФ

НОВЫЙ ПОЛЮСНЫЙ НАКОНЕЧНИК

Широкий межполюсный зазор нового полюсного наконечника объективной линзы обеспечивает сверхчувствительный рентгеновский анализ (общий телесный угол 2,2 ср) и позволяет использовать специальные держатели образца для проведения наблюдений *in situ* в жидкости и газе.

Новый полюсный наконечник объективной линзы (FHP2) с увеличенным межполюсным зазором более чем в два раза повышает эффективность детектирования рентгеновских лучей (1,4 ср) в сравнении с предшественником (FHP).

FHP2 с низкими сферическими и хроматическими aberrациями позволяет получить сверхвысокое пространственное разрешение и проводить высокочувствительный рентгеновский анализ во всем диапазоне ускоряющих напряжений.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВСЕХ СИСТЕМ

Корректоры сферической aberrации обеспечивают сверхвысокое пространственное разрешение.

Холодная автоэмиссионная пушка (Cold-FEG) GRAND ARM™2 существенно сокращает дисперию энергии электронов.

Новый экранирующий кожух, входящий в стандартную комплектацию, снижает влияние внешних факторов: изменений температуры, акустического шума, воздушных потоков.

ООО “ДЖЕОЛ (РУС)”

www.jeolrus.com
www.jeol.co.jp/en

JSM-IT800 – растровый электронный микроскоп с автоэмиссионным катодом Шоттки

Высочайший уровень аналитического интеллекта, элегантная функциональность и сверхвысокое разрешение для максимально быстрого и простого получения данных исследований – от наблюдения до элементного анализа

Наблюдение с высоким пространственным разрешением. Вверху: бёмит (γ -AlO(OH)), видна наноструктура толщиной менее 10 нм. Внизу: частицы оксида алюминия, на поверхности частиц отчетливо наблюдаются единичные нм-ступени

ЭДС-картирование на наноуровне. Наночастицы Ag на поверхности диоксида титана

JSM-IT800 – новейший микроскоп со сверхвысоким пространственным разрешением. Оснащен автоэмиссионным катодом Шоттки с новой технологией In-Lens Schottky Plus и электронно-оптической системой нового поколения с программным управлением электронным пучком в реальном времени Neo Engine.

Увеличение до 2 млн. и диапазон ускоряющего напряжения от 0,01 до 30 кВ для получения изображений с потрясающей детализацией наноструктур и всестороннего анализа материалов и биологических образцов.

Интегрированный энергодисперсионный рентгеновский спектрометр, гибридная (электромагнитная/электростатическая) линза и система детектирования электронов через линзу идеальны для изучения магнитных материалов, диэлектриков и анализа образцов методом дифракции обратнорассеянных электронов.

Функция ZeroMag позволяет легко находить объекты исследования по оптическому изображению образца.

ООО «ДЖЕОЛ (РУС)»

www.jeolrus.com
www.jeol.co.jp/en

Рис.5. ПРЭМ-изображение в режиме HAADF (а) и его фурье-образ (б) для GaN [211]. Получено на GRAND ARM 2 с полюсным наконечником FHP2 и корректором ETA при 300 кВ

на HAADF-изображении видны только атомы галлия, то на ABF-изображении и на ЭДС-карте четко отобразились также и атомы азота. При этом даже на ЭДС-карте достаточно четко видны гантели Ga-Ga, что соответствует пространственному разрешению лучше 63 пм.

FHP2 может обеспечивать сверхвысокое пространственное разрешение даже при низком ускоряющем напряжении, поскольку, как и FHP, имеет небольшой коэффициент хроматической aberrации. На рис.7 показаны ПРЭМ-изображения в режимах HAADF и ABF, а также результат обработки БПФ-фильтром изображения HAADF для GaN [110], полученные на микроскопе с FHP2 при 60 кВ. На изображении HAADF видны атомы галлия, а на ABF-изображении четко разрешены также и атомы азота. На обработанном БПФ-фильтром HAADF-изображении различимы элементы с разрешением не хуже 75 пм. Таким образом, конфигурация с полюсным наконечником FHP2 позволяет достигать субангстремного разрешения даже при ускоряющем напряжении 60 кВ.

На рис.8 показаны ЭДС-карты распределения элементов в монослой WS_2 , полученные на электронном микроскопе с FHP2 и сдвоенным SDD-детектором площадью 158 мм² при

Рис.7. ПРЭМ-изображения GaN [110], полученные с атомным разрешением на GRAND ARM 2 с FHP2 и корректором ETA при 60 кВ: а – в режиме HAADF; б – в режиме ABF; в – фурье-образ HAADF-изображения

Рис.6. ПРЭМ-изображения GaN [211], полученные на GRAND ARM2 с FHP2 и сдвоенным SDD-детектором площадью 158 мм² при 300 кВ: а – режим ABF; б – ЭДС-карта после применения фильтра Винера; в – режим HAADF

80 кВ. На изображениях четко видны атомы серы и вольфрама. Это значит, что полюсный наконечник FHP2 позволяет успешно решать сложную задачу получения ЭДС-карт с атомарным разрешением даже для монослоев 2D-материалов.

Рис.8. ПРЭМ-изображение монослоя WS_2 и ЭДС-карты распределения элементов после применения фильтра Винера, полученные на GRAND ARM 2 с FHP2 и сдвоенным SDD-детектором площадью 158 мм² при 80 кВ: а – в режиме HAADF; б – наложение ЭДС-карт распределений серы и вольфрама; в – ЭДС-карта распределений серы, линия Ka; г – ЭДС-карта распределений вольфрама, линия Ma

Рис.9. Результаты тестирования предела чувствительности GRAND ARM и GRAND ARM 2 при внесении искусственного шума от 65 до 95 дБ

Приведенные примеры позволяют сделать вывод, что FHP2 является универсальным полюсным наконечником, обеспечивающим как получение изображений со сверхвысоким пространственным разрешением, так и проведение высокочувствительного химического анализа в широком диапазоне ускоряющих напряжений. Микроскоп GRAND ARM 2 с FHP2 может применяться для исследования широкого спектра образцов, включая не только твердые, но и мягкие материалы.

ЭКРАНИРУЮЩИЙ КОЖУХ И ВЫСОКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ К ПОМЕХАМ

Дизайн GRAND ARM 2 был значительно изменен по сравнению с предшествующей моделью. Колонна ПЭМ теперь закрыта кожухом из металлических рам и панелей (рис.1), который улучшает стабильность прибора, снижая влияние на результаты измерений факторов окружающей среды, таких как температура, воздушные потоки, акустический шум.

На рис.9 представлены результаты оценки пределов чувствительности GRAND ARM и GRAND ARM 2 в режиме ПЭМ при добавлении искусственного шума от 65 до 95 дБ. На обработанном БПФ-фильтром ПЭМ-изображении потеря информации тем больше, чем выше уровень помех. В микроскопе GRAND ARM элементы размером менее 1 Å исчезают при шуме выше 75 дБ, а в GRAND ARM 2 в большинстве случаев они продолжают воспроизводиться даже при помехах около 90 дБ. Таким образом, потери информации вследствие шума в GRAND ARM 2 меньше, чем в предшествующей версии прибора. Сравнение результатов при шуме 75 дБ, который

соответствует звуковым помехам от телевизора или дорожного движения, показывает, что GRAND ARM 2 почти вдвое превосходит предшественника по уровню чувствительности – 60 нм против 118 нм. То есть GRAND ARM 2 обладает в два раза большей устойчивостью к внешним шумам по сравнению с GRAND ARM.

В стандартной комплектации нового микроскопа внутри экранирующего кожуха размещен подъемный кран. С его помощью можно передвигать электронную пушку, объективную линзу и т. д., поэтому пользователю не требуются дополнительные грузоподъемные устройства. Встроенный кран повышает эффективность работы при проведении технического обслуживания микроскопа.

Помимо добавления защитного кожуха, в конструкцию микроскопа внесено множество изменений, дополнительно улучшающих стабильность работы и устойчивость GRAND ARM 2 к различным помехам. Одно из этих изменений касается гетероионного насоса в электронной пушке CFEG (Cold Field emission Electron Gun – автоэмиссионная электронная пушка с холодной полевой эмиссией электронов). Теперь используется насос меньшего размера, но с большей скоростью откачки, чем ранее. Увеличение скорости откачки повысило уровень вакуума вблизи эмиттера электронной пушки, а также стабильность эмиссии электронов и тока электронного пучка (рис.10). Применение более легкого насоса позволило уменьшить общую массу CFEG примерно на 100 кг, что повысило устойчивость микроскопа к вибрациям.

Еще одна модификация коснулась корректора ERA: оптимизирован диаметр его отверстия и повышена эффективность охлаждения. Благодаря этому снижен уровень электрических шумов в корректоре и повышена стабильность его работы. Также была доработана электроника объективной линзы и вакуумного насоса. Повышение электрической

Рис.10. Сравнение стабильности тока пучка старой и новой электронных пушек с холодной полевой эмиссией

Рис.11. ПРЭМ-изображения Si [110] (а, б) и GaN [211] (в, г) в режиме HAADF и их фурье-образы, полученные на GRAND ARM 2 с полюсным наконечником WGP и корректором ETA при 300 кВ

стабильности осветительной линзы и оптимизация заземления вакуумного насоса уменьшили электрические шумы в микроскопе. Кроме того, модификация шлангов для охлаждения объективной линзы и оптимизация крепления осветительной линзы, полюсного наконечника объективной линзы и криоловушки уменьшили вибрации в микроскопе.

В результате добавления защитного кожуха и перечисленных модификаций конструкции удалось повысить электрическую и механическую стабильность GRAND ARM 2, что значительно улучшило качество изображения и пространственное разрешение, в частности, в режиме ПРЭМ. На рис.11 показаны ПРЭМ-изображения в режиме HAADF и результаты их обработки БПФ-фильтром для Si [110] и GaN [211], полученные на GRAND ARM 2 с полюсным наконечником WGP и корректором ETA. Даже в этой конфигурации на фурье-образах отчетливо видны элементы размером около 50 пм, что указывает на значительное улучшение пространственного разрешения GRAND ARM 2 по сравнению с предшествующей моделью (табл.1).

Дополнительно в GRAND ARM 2 была улучшена стабильность работы с высоким разрешением при использовании держателей с нагревом образцов и других специальных держателей производства третьих фирм. В предыдущей модели при их установке крышку гониометра приходилось оставлять открытой, так как закрыть ее мешал кабель, которым держатель подключался к блоку управления и/или монитору. При этом из-за внешних помех создавался дополнительный шум на изображении и снижалось пространственное разрешение. В GRAND ARM 2 предусмотрен внутренний разъем для подключения кабеля специального держателя образца, соединенный с внешним разъемом на защитном кожухе,

к которому подключается блок управления и/или монитор. Поскольку любые держатели теперь могут использоваться с закрытой крышкой гониометра, улучшается стабильность работы и пространственное разрешение в случаях, когда образцы должны исследоваться в специальных условиях.

Таким образом, по сравнению с предыдущей моделью GRAND ARM 2 обладает более высокой устойчивостью к внешним помехам за счет применения защитного кожуха и повышенной электрической и механической стабильности. Из этого следует, что микроскоп должен хорошо работать в различных условиях окружающей среды, в том числе при эксплуатации за пределами Японии, стран Европы и США.

НОВЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ФУНКЦИИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ УДОБСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В стандартную комплектацию GRAND ARM 2 входят цифровые камеры, установленные внутри камеры наблюдения колонны ПЭМ. Для управления ими служит ПО Sight-X. Используются два типа цифровых камер: ПЗС-камера для наблюдения за большим флуоресцентным экраном и КМОП-камера для наблюдения за малым флуоресцентным экраном. Пользователь может легко переключаться между ними с помощью всего одной кнопки на панели управления.

ПО TEM Center для управления основным блоком ПЭМ, ПО JEOL COSMO для управления корректором аберраций и Sight-X интегрированы в одном управляющем компьютере, который в базовой версии комплектуется монитором с диагональю 43 дюйма. Поскольку интерфейсные окна всех программ могут отображаться на мониторе одновременно, работа с микроскопом стала значительно удобней. С помощью кабеля USB, подключаемого к панелям управления,

Табл.1. Гарантированное максимальное разрешение в режиме ПРЭМ с корректором ETA для GRAND ARM и GRAND ARM 2 с разными полюсными наконечниками объективной линзы

Ускоряющее напряжение, кВ	Разрешение, пм			
	GRAND ARM		GRAND ARM 2	
	FHP	WGP	FHP2	WGP
300	62	82	53	59
200	78	105	63	82
80	136	136	96	111
60	136	192	96	136
40	192	313	136	192

микроскопом можно управлять с дистанции до 15 м. Кроме того, опционально возможно управление по локальной сети.

В ПО TEM Center и JEOL COSMO добавлены либо значительно улучшены многочисленные автоматические функции. Например, если в предыдущей модели для переключения ускоряющего напряжения пользователю нужно было выполнить ряд сложных операций, то теперь достаточно просто установить требуемое значение и нажать кнопку "пуск" – все необходимые настройки колонны микроскопа и корректора аберраций будут произведены автоматически. Также автоматически срабатывает механизм предотвращения коротких замыканий при низких ускоряющих напряжениях. Установка ускоряющего напряжения после завершения кондиционирования, которое необходимо после отжига образца, тоже автоматизирована. Благодаря этому повышается эффективность работ по техническому обслуживанию микроскопа.

Кроме того, в GRAND ARM 2 появилась автоматическая функция "лучевого душа", которая является одним из методов борьбы с загрязнением образца. Эта функция запускается нажатием одной кнопки при заданных интенсивности электронного пучка и значениях расфокусировки. По истечении установленного времени настройки электронного луча автоматически возвращаются к исходным значениям.

Хорошо зарекомендовавшее себя в GRAND ARM ПО для коррекции аберраций JEOL COSMO также улучшено за счет оптимизации параметров циклического скрипта. Он обеспечивает полуавтоматическую коррекцию и позволяет даже новичкам легко исправлять аберрации изображения.

Также в GRAND ARM 2 добавлены функции, повышающие удобство работы. Например, в предшествующей модели наблюдалось расхождение между направлениями перемещения диафрагмы и изображения на экране. В GRAND ARM 2 этот недостаток устранен благодаря обновленной электронно-оптической системе и коррекции поворота изображения. Теперь на ПЭМ-изображении диафрагма перемещается в том же направлении, которое задано на панели управления. Аналогичным образом, путем коррекции поворота, согласованы направления перемещения держателя образцов и движения ПЭМ- и ПРЭМ-изображений. В частности, в режиме ПРЭМ угол сканирования изображения в некоторых случаях изменяется из-за отноше-

ния амплитуд сканирования по разным осям, но даже тогда направление перемещения сканированного изображения на мониторе сохраняется. Соответственно, если пользователь задает перемещение держателя вверх или вправо, изображение на мониторе движется вверх или вправо.

Добавление новых функций, которые отсутствовали в предыдущей модели, позволило улучшить рабочие характеристики микроскопа, обеспечить легкость управления и высокую производительность. Эти новшества дают возможность широкому кругу пользователей – от начинающих до экспертов – успешно использовать GRAND ARM 2 в своих исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компанией JEOL разработана усовершенствованная модель просвечивающего электронного микроскопа с коррекцией аберраций и ускоряющим напряжением 300 кВ – GRAND ARM 2, которая может быть оборудована новым полюсным наконечником объективной линзы FHP2. Электрическая и механическая стабильность нового микроскопа повышена за счет использования экранирующего кожуха и комплекса других мер. Также добавлены новые функции для повышения удобства управления микроскопом. GRAND ARM 2 позволяет получать изображения со сверхвысоким пространственным разрешением и выполнять высокочувствительный рентгеновский субангстремный анализ различных образцов, причем им могут управлять даже неопытные пользователи. Микроскоп может эксплуатироваться в сложных условиях окружающей среды. Ожидается, что этот прибор будет полезен для изучения новейших наноматериалов, как уже известных, так и тех, которые появятся в ближайшие годы.

Авторы благодарят Томохису Фукуду, Кимитаку Хияму, Наоки Фудзимото, Сюнаку Ваки, Юдзи Ямадзак, Киохэя Терасаки, Аримаса Ханаву, Хироюки Танака, Кацухиро Тояма, Синичи Танба, Такахиро Сасаке, Такеши Ивама, Такахиро Симадзак, Фумихиро Коба, Наоки Симура, Дзюничи Моримото, Йоринобу Ивасава, Кодзи Миятаке, Юсукэ Торигуни, Сигэюки Морисита, Норикадзу Арима, Есифуми Хамада, Акихиро Икеда, Юта Сано, Юдзи Кавано, Масаки Мукай, Хидетаку Савада и других участников проекта, которые помогли в разработке GRAND ARM 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sawada H., et al. Super high resolution imaging with atomic resolution microscope of JEM-ARM300F // JEOL News. 2014. No. 49. P. 51–58.
2. Sawada H., et al. Resolving 45-pm-separated Si–Si atomic columns with an aberration-corrected STEM // Microscopy. 2015. Vol. 64. No. 3. P. 213–217.
3. Morishita S., et al. Attainment of 40.5 pm spatial resolution using 300 kV scanning transmission electron microscope equipped with fifth-order aberration corrector // Microscopy. 2018. Vol. 67. No. 3. P. 46–50.
4. Okunishi E., et al. Development of super-high sensitivity EDS system for GRAND ARM (JEM-ARM300F) // JEOL News. 2015. Vol. 50. P. 58–63.
5. Ohnishi I., et al. Analytical and in situ applications using aberration corrected scanning transmission electron microscope // e-J. Surf. Sci. Nanotech. 2018. Vol. 16. P. 286–288.

НОВЕЙШИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОСКОПЫ ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

JEM-ARM300F2 (GRAND ARM™2) – просвечивающий электронный микроскоп с атомарным разрешением

позволяет исследовать образцы, ранее недоступные
или сложные для анализа

Полносный наконечник FHP2

- Сверхчувствительный рентгеновский анализ при сверхвысоком разрешении. Телесный угол сбора детектора 1,4 стерadiana.
- Изображение с пространственным разрешением 53nm при 300kV и 96nm при 80kV.

Полносный наконечник WGP

- Установка энергодисперсионных спектрометров с увеличенной площадью регистрирующего элемента.
- ЭДС-анализ в режиме реального времени. Телесный угол сбора детектора 2,2 стерadiana.
- Держатели образцов: с механической нагрузкой на образец, с охлаждением или нагревом, с ячейками естественной среды и т.д.

JSM-IT800 – растровый электронный микроскоп высокого разрешения с термополевым катодом Шоттки

функциональность, сверхвысокое разрешение
и мощное программное обеспечение

- Термополевая электронная пушка новой конструкции In-Lens Schottky Plus.
- Электроно-оптическая система нового поколения Neo Engine.
- Полностью интегрированная система энергодисперсионного микроанализа.
- Графический интерфейс пользователя SEM Center с опциями помощи начинающим, интеллектуальным фильтром обработки изображений и системой быстрой генерации отчетов SMILE VIEW™ Lab.
- Доступны модификации с гибридной линзой (версия HL) и с супергибридной линзой (версия SHL) – для наблюдения и анализа при сверхнизком ускоряющем напряжении и с максимальным разрешением.

www.intactive.ru

Interactive Corporation

Главный офис в Японии
TEL 81-35-695-1035
FAX 81-35-695-0665
shingaki@inter-active.co.jp

Представительство в РФ
+7-495-748-2007
+7-495-737-6158
info@intactive.ru