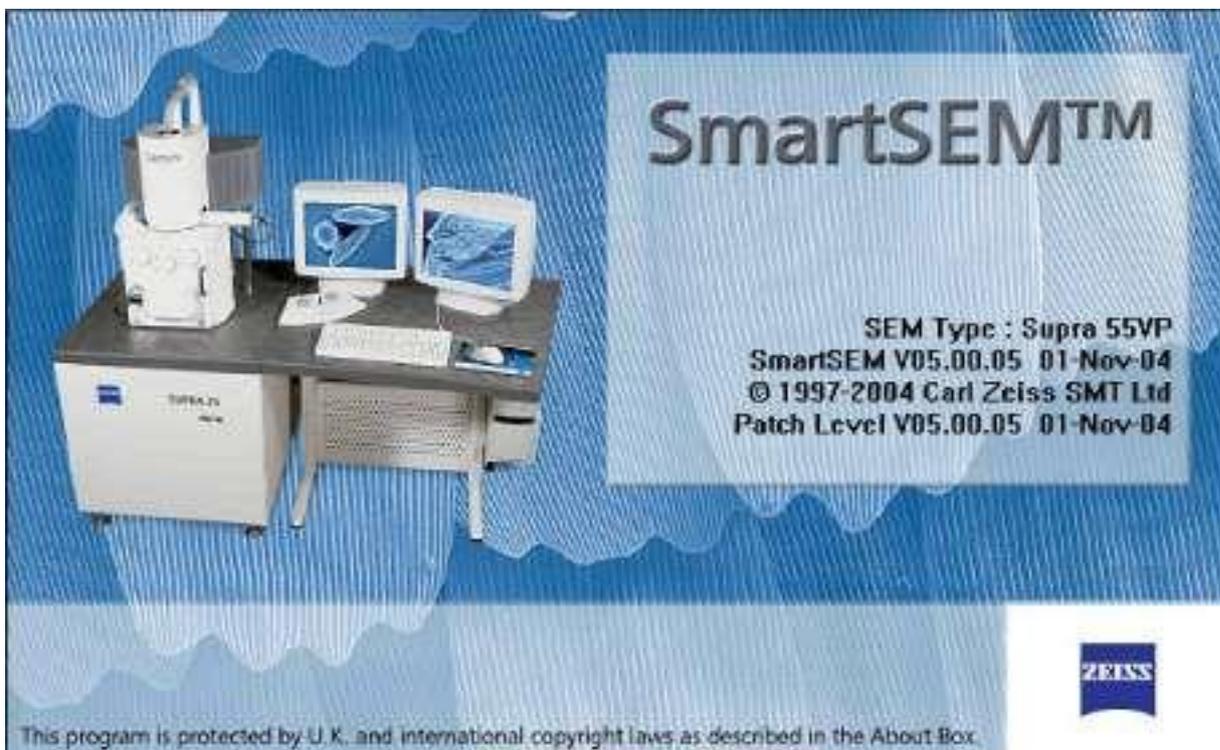


# Инструкция по эксплуатации сканирующих электронных микроскопов SUPRA (VP) и ULTRA

*(SmartSEM V 05.00)*



## Содержание

### **1 Введение**

### **2 Электронная оптика, вакуумная система и детектирование**

#### **2.1 Электронная оптика**

#### **2.2 Вакуумная система**

#### **2.3 Детектирование**

2.3.1 Встроенный в линзу детектор (In-lens Detector)

2.3.2 Детектор SE2

2.3.3 Детектор EsB

2.3.4 Детектор BSE

2.3.5 Детектор 4QBSD

2.3.6 Детектор Centaurus

#### **2.4 Работа в режиме VP(изменяемого давления)**

2.4.1 Принцип работы режима VP

2.4.2 Устройство вакуумной системы

2.4.3 Детектирование в режиме VP

### **3 Настройки и структура ПО SmartSEM и LEO32**

#### **3.1 Администратор**

3.1.1 Создание директорий пользователей

3.1.2 Удаление директорий пользователей

3.1.3 Лицензий на ПО для инсталлирования и редактирования

3.1.4 Конфигурация системы

#### **3.2 Пользовательский интерфейс SmartSEM**

3.2.1 Стандартная панель инструментов

3.2.2 Важные клавиши и комбинации клавиш

3.2.3 Запуск микроскопа и смена образцов

3.2.4 Параметры, важные для создания изображений

3.2.5 Оптимизация изображений

3.2.6 Завершение сеанса работы

#### **3.3 Всплывающее меню**

3.3.1 Пункт меню FILE

3.3.2 Пункт меню EDIT

3.3.3 Пункт меню VIEW

3.3.4 Пункт меню BEAM

3.3.5 Пункт меню DETECTION

3.3.6 Пункт меню IMAGE

3.3.7 Пункт меню SCANNING

3.3.8 Пункт меню STAGE

3.3.9 Пункт меню VACUUM

3.3.10 Пункт меню TOOLS

3.3.11 Пункт меню HELP

### **4 Функции предметного столика**

#### **4.1 Использование пульта управления/ джойстика**

4.1.1 Виртуальный джойстик

4.1.2 Пульт управления CAN

4.1.3 Серийный пульт управления

#### **4.2 Инициализация предметного столика (STAGE INITIALISE)**

#### **4.3 Сохранение координат столика (STORE/ RECALL) (требуется лицензия: STAGCO)**

#### **4.4 Функции центрирования (CENTRE POINT/ FEATURE) (требуется лицензия: CENTRE)**

#### **4.5 Сканирование полей (STAGE SCAN) (требуется лицензия: STAGESCAN)**

#### **4.6 STAGE MAP (требуется лицензия CENTRE)**

---

- 
- 4.7 Режим обзора** (требуется лицензия SURVEY)
  - 4.8 Регистрация предметного столика** (требуется лицензия STAGEREG)
    - 4.8.1 Задание системы координат по двум опорным точкам
    - 4.8.2 Задание системы координат по трем опорным точкам
  - 4.9 Программное обеспечение эвцентричности** (требуется лицензия COMPU)
    - 4.9.1 Юстировка центра предметного столика
    - 4.9.2 Настройка эвцентричности
    - 4.9.3 Выравнивание предметного столика по горизонтали
  - 4.10 Управление предметным столиком**
    - 4.10.1 Вкладка Stage Status tab
    - 4.10.2 Вкладка Stage Navigation Tab
    - 4.10.3 Вкладка Stage Properties tab
    - 4.10.4 Вкладка Stage Points List tab
    - 4.10.5 Вкладка Stage Scanning Tab

## **5 Специальные меню и настройки**

### **5.1 Окно управления СЭМ (SEM Control)**

- 5.1.1 Детекторы
- 5.1.2 Сканирование
- 5.1.3 Вакуум
- 5.1.4 Вакуум зоны пушки
- 5.1.5 Электронная пушка
- 5.1.6 Апертуры (диафрагмы)
- 5.1.7 Предметный столик
- 5.1.8 Рентгеновское излучение X-Ray (требуется лицензия: XRAY)

### **5.2 Окно состояния СЭМ (SEM Status)**

### **5.3 Сохранение, загрузка и печать изображений**

- 5.3.1 Специальные настройки для сохраняемых изображений
- 5.3.2 Сохранение дополнительной информации вместе с изображением
- 5.3.3 Загрузка изображения
- 5.3.4 Функция галерея (Gallery)
- 5.3.5 Запрос сохраненных параметров
- 5.3.6 Сохранение изображений в форматах BMP и JPEG
- 5.3.7 Печать изображений на установленном принтере

### **5.4 Ввод таблиц преобразования LUT:** (требуется лицензия: GAMMALUT)

### **5.5 Редактирование изображений с помощью LUT**

### **5.6 Комментарии и измерения на изображениях**

- 5.6.1 Расширенные возможности осуществления измерений (требуется лицензия: MEASA)
- 5.6.2 Основные настройки для измерений, комментариев и наложений
- 5.6.3 Редактирование, сохранение и загрузка измерений и комментариев
- 5.6.4 Настройка и редактирование зоны данных

### **5.7 Специальные режимы сканирования**

- 5.7.1 Уменьшенный растр (Reduced)
- 5.7.2 Двойной экран (требуется лицензия: SPLIT)
- 5.7.3 Увеличение фрагмента Dual Mag (требуется лицензия: DUALMAG)
- 5.7.4 Режим пятна (Spot)
- 5.7.5 Режим линейного сканирования (Line Scan)
- 5.7.6 Динамический фокус (требуется лицензия: DYNFOCUS)
- 5.7.7 Коррекция угла наклона (требуется лицензия: TILTCOMP)
- 5.7.8 Поворот поля изображения (требуется лицензия: SCANROT)
- 5.7.9 Одновременная работа в нескольких окнах
- 5.7.10 Съемка видеороликов в формате AVI

### **5.8 Второе окно с изображением – двойное изображение**

### **5.9 Обработка изображений** (требуется лицензия: IMMATH)

- 5.9.1 Манипуляции с изображением
- 5.9.2 Определение значений серого (порогового значения)
- 5.9.3 Оптимизация гистограммы

- 
- 5.9.4 Фильтр (**2D** фильтр)
  - 5.9.5 Фильтр в режиме реального времени
  - 5.10 Редактирование панели инструментов в ПО Windows® 2000**
    - 5.10.1 Создание нового символа (пример)
    - 5.10.2 Использование битовых массивов в качестве символов на панели инструментов
  - 5.11 Редактирование панели инструментов в ПО Windows® XP**
    - 5.11.1 Создание нового символа (пример)
  - 5.12 Редактор макросов**
    - 5.12.1 Макрос „START“
    - 5.12.2 Назначение макросов на функциональные клавиши
    - 5.12.3 Примеры макросов
  - 5.13 Увеличение и настройка для разных устройств вывода**
    - 5.13.1 Настройка устройства вывода
    - 5.13.2 Калибровка пользовательских настроек увеличения
  - 5.14 Буфер обмена (необходима лицензия: CLIP)**
  - 5.15 Режим получения изображений**
  - 5.16 Предпочтения пользователя**
  - 5.17 Функция подсказки - Help**
  - 6 Дополнительные применения**
    - 6.1 Прогрев ионного геттерного насоса**
    - 6.2 Модификация модуля ZTR на столике, работающем в декартовой системе координат**
    - 6.3 Работа с охлаждаемым предметным столиком**
    - 6.4 Воздушные шлюзы для образцов**
    - 6.5 Коррекция дрейфа на СЭМ (требуется лицензия: DRIFT-CORR)**
    - 6.6 Программа Parachute Archiving**
    - 6.7 RemCon32 (Необходима лицензия: REMCON)**
    - 6.8 Программа управления электронной пушкой - Gun Monitor Utility**
    - 6.9 Поток воды / температура воды**
    - 6.10 Работа с измерителем тока образца**
    - 6.11 Программа FTP Remote Archiving (требуется лицензия: REMARCH)**
    - 6.12 Программа Accounting (требуется лицензия: ACCOUNT)**
      - 6.12.1 Опция Review
      - 6.12.2 Группы пользователей Owners



## 1 Введение

В течение последних десятилетий сканирующая электронная микроскопия нашла применение во многих отраслях науки и промышленности. Сегодня сканирующие электронные микроскопы (СЭМ) широко применяются в традиционных исследованиях материалов и анализе их повреждений, в электронной и полупроводниковой промышленности, и даже в биологии, химии и других естественных науках. Благодаря легкости в управлении современными инструментами, многие лаборатории вряд ли представляют свою работу без СЭМ, когда нужно быстро и точно решить прикладные задачи. Более того сканирующие электронные микроскопы имеют ряд преимуществ перед традиционной оптической микроскопией и другими аналитическими методами:

Лучшие возможности разрешения

Высокая глубина фокуса

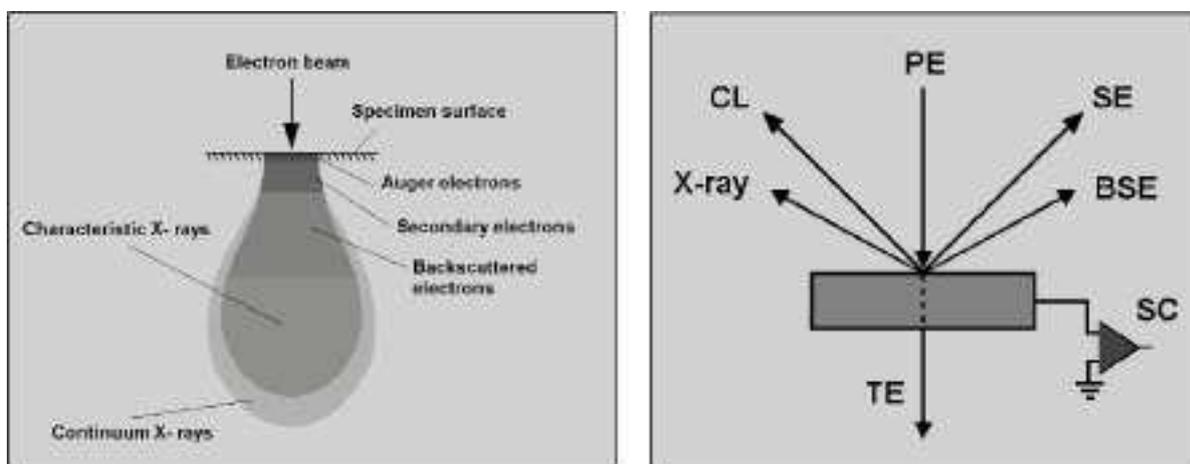
Меньше работы, связанной с подготовкой образцов

Использование различных контрастирующих методов для создания изображения

Простая интерпретация изображения благодаря эффекту трехмерного восприятия

Относительно простая стыковка с другими методами микро-анализа

Все эти особенности делают СЭМ ценным инструментом для исследования множества различных материалов. Развитие инструментов с возможностью VP-режима (от **Variable Pressure**) сильно расширило возможности применения СЭМ. Сильно газящие, загрязненные, влажные или не проводящие образцы, которые либо не могут быть исследованы вообще, либо могут быть исследованы только после специальной подготовки, теперь можно легко наблюдать под микроскопом без артефактов и повреждений. С другой стороны, для проведения научно-исследовательской работы сильно возросла потребность в оптимальной работе оборудования при очень низком потенциале возбуждения. Такие технологии не создают ионов для получения равновесного заряда, как в технологии VP. Энергия и ток электронного луча уменьшаются до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между поглощенным и испущенными зарядами. Такая методика позволяет получать изображение от непроводящих или частично проводящих образцов. Т.к. энергия первичного электронного пучка понижена, электроны проникают в материал не так глубоко. Поэтому можно получить изображение особенностей поверхности соответствующего образца. Возможность получать изображения при низких напряжениях очень важна для полупроводниковой промышленности и для разработки новых материалов.



Когда первичный электронный луч сканирует поверхность образца, в зависимости от свойств материала и от установленного ускоряющего напряжения, вторичные продукты образуют зону возбуждения, которая может использоваться для получения изображений и анализа. Чаще всего для получения изображений используют вторичные электроны (SE) и обратно отраженные электроны (BSE). Кроме того, материалы часто исследуют с помощью рентгеновских лучей, используя спектрометр для энергорассеивающего рентгеновского анализа (EDX) или для рентгеновского анализа по волновому рассеянию (WDX). Если при попадании электронов на поверхность образца возникает свечение, это можно зарегистрировать с помощью детектора катодолюминисценции (CL), который в

этом случае используется для получения изображений. Если фотоны анализируются с помощью спектрометра, эту информацию также можно использовать для описания материала. Изображение можно получить также с помощью потока электрического тока через образец (SC- ток образца / EBIC – ток, индуцированный электронным лучом). Если образец достаточно тонкий, с помощью специального детектора можно анализировать проходящие электроны и использовать их для получения изображения.

Т.о., в распоряжение попадает большое количество информации, которую можно оценивать с помощью различных систем детектирования. В зависимости от поставленной задачи и объекта исследования, для решения прикладных задач выбирают и используют соответствующий источник сигнала.

Данное руководство поможет пользователю в работе с электронным микроскопом. Здесь дается подробное объяснение программного обеспечения, контролирующего работу СЭМ, а также содержится полезная информация о работе электронного микроскопа и использовании различных источников сигнала.

Глава 2 содержит информацию о электронной оптике, системе обеспечения вакуума и детектирования. Здесь также подробно описываются различные детекторы и механизмы контрастности. Отдельный раздел посвящен работе в режиме VP, который прилагается к оборудованию с VP-технологией.

Глава 3 предлагает основную информацию по настройке и структуре различных функций Администратора, важные указания по запуску и работе микроскопа, а также основную информацию о создании и настройке изображений. Тут также содержится основная информация по всем подменю в всплывающем меню (PopUp). Различные меню перечислены и объясняются в том же порядке, что и для PopUp меню – это позволит пользователю быстро находить нужную информацию в соответствующем меню.

Глава 4 посвящена моторизированному предметному столику и содержит основную информацию об управлении столиком, и о специальных функциях и возможностях применения моторизированного столика.

Глава 5 дает информацию о меню и функциях, наиболее часто используемых в повседневной работе с микроскопом, таких как загрузка, сохранение и печать изображений, редактирование и измерение изображений, различные режимы сканирования, а также содержит информацию о панели инструментов и редакторе макросов.

Дополнительные функции, такие как прогрев ионного геттерного насоса, модификация модуля ZTR, работа с воздушными шлюзами для образцов, а также использование охлаждаемого предметного столика рассматриваются в главе 6, которая также содержит информацию о том, как сохранять данные, как пользоваться программой REMCON32 или как формировать и использовать специальные базы данных с помощью функции *Accounting* (учет).

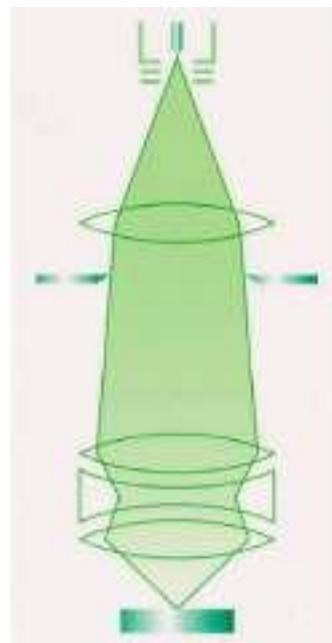
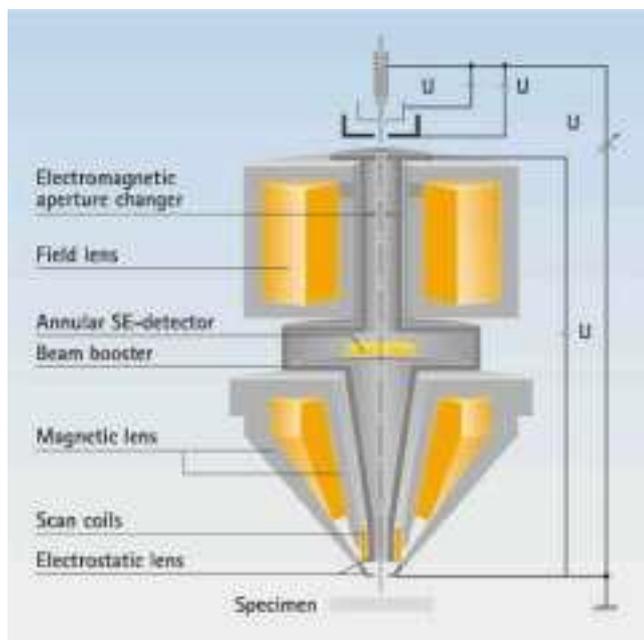
Данное руководство поможет неопытным пользователям быстро приступить к работе с электронным микроскопом и получить полезную информацию о различных прикладных задачах. Более опытные пользователи получают полезные подсказки для освоения дополнительных возможностей, которые могут быть использованы вместе с программным обеспечением SmartSEM.

## 2 Электронная оптика, система обеспечения вакуума и детектирования

### 2.1 Электронная оптика

Аппараты серии SUPRA и ULTRA оборудованы самыми современными системами электронной оптики, специально разработанными для обеспечения превосходного результата при низком напряжении. Сначала оптические аппараты были с траекторией пучка без кроссовера. Основной чертой оптики GEMINI является так называемый усилитель пучка и объектив, состоящий из комбинированной электростатической/электромагнитной линзы-дуплета.

Электроны, испускаемые пушкой, проходя к аноду ускоряются до установленного значения ускоряющего напряжения. Усилитель пучка, потенциал которого всегда равен 8кВ при ускоряющем напряжении <20кВ, установлен непосредственно за анодом для того, чтобы энергия электронов на всей траектории пути всегда была на 8кВ выше, чем установленное ускоряющее напряжение. Это значительно снижает чувствительность электронного пучка к магнитным полям рассеяния. Перед тем как электронный пучок выходит из объектива, электростатическая линза создает поле противодействия, которое снижает потенциал электронов на 8кВ. Т.о., энергия электронов, достигающих поверхность образца, соответствует установленному ускоряющему напряжению.



Главное преимущество этой методики это то что, используя аппарат при низком напряжении электроны должны пройти небольшое расстояние между объективом и поверхностью образца, имея невысокую энергию, в то время как энергия, необходимая для прохождения всей траектории пучка, гораздо выше. С другой стороны, замедляющее поле электростатической линзы действует как коллектор для генерируемых на поверхности образца электронов. Эти электроны отклоняются от центра пятна электростатическим полем. Они ускоряются и фокусируются магнитным полем встроенного детектора и EsB детектора.

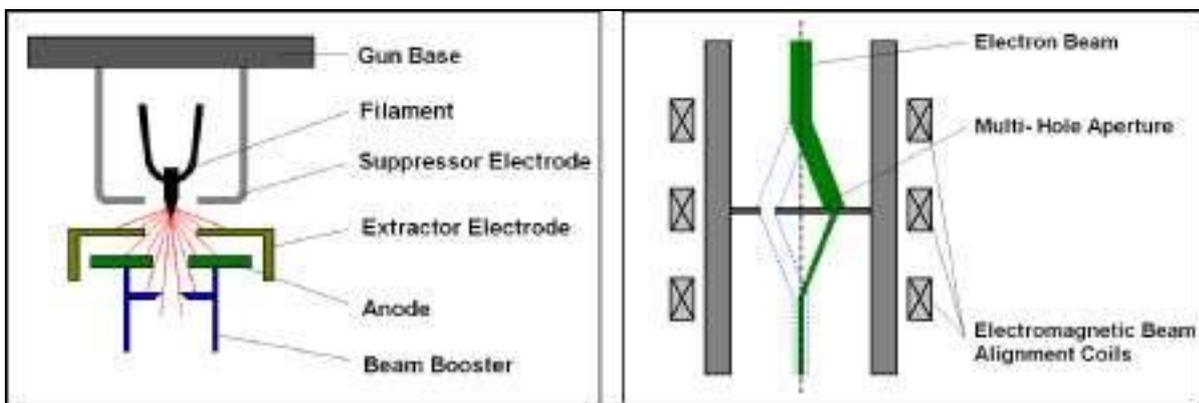
Наложение действия электростатической линзы и магнитного поля электромагнитной линзы также значительно снижает хроматическую ошибку оптики, что приводит к значительному улучшению качества отображения особенно при низких напряжениях.

Генератор луча представляет собой наконечник, обеспечивающий термоэлектронную эмиссию, который называют эмиттер Шотки (катод ZrO/W). Он представляет собой чисто протравленный (100) ориентированный кристаллизированный вольфрамовый наконечник, тело которого представляет собой источник оксида циркония. Наконечник нагревается спекающим током (Fil I) приблизительно до 1800К.

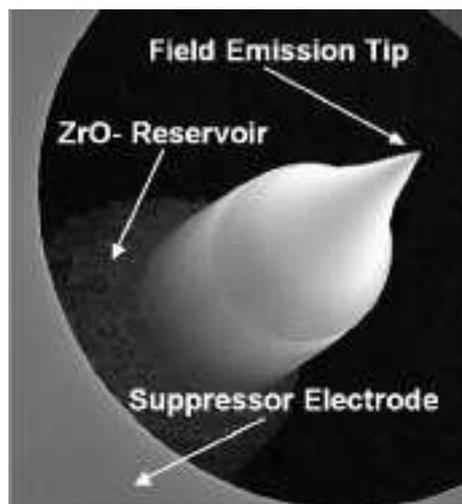
Если генерируется электрическое поле (экстрактор), ZrO будет диффундировать в наконечник катода и будет образовываться острый конец. ZrO снижает энергию эмиссии электронов с 4,6 эВ до 2,48 эВ и ограничивает электронную эмиссию по оси наконечника.

В зависимости от температуры катода и напряженности поля на конце катода, которую можно отрегулировать с помощью напряжения на электроде экстрактора (extractor electrode), устанавливается равновесие, которое обеспечивает стабильную эмиссию для источника FE. Противодействующее поле генерируется электродом подавителя (suppressor electrode) для предотвращения эмиссии тепловых электронов, испущенных не наконечником катода, а нагретой вольфрамовой проволокой нити накала (filament), которые будут способствовать рассеянию энергии электронного луча.

Необходимое значение тока пучка может быть установлено с помощью диафрагмы с шестью отверстиями. Такая диафрагма (multi-hole aperture) устанавливается на пути луча. Электромагнитным переключателем можно переключаться между различными диафрагмами. Электронный луч отклоняется над диафрагмой, проходит сквозь отверстия и возвращается к оптической оси за диафрагмой. В обычных микроскопах диафрагма на пути луча закрепляется механическим способом (например, микрометрическими винтами), что не применяется в микроскопах SEM последнего поколения. Электронный луч настраивается внутри диафрагмы, а не наоборот.



Для каждого эмиттера Шотки есть свои значения тока спекания и напряжения на экстракторе, обеспечивающие стабильную эмиссию для наконечника. Соответствующие значения устанавливаются обслуживающим персоналом после замены нити накаливания. Изменения значения тока спекания могут сократить срок службы нити накаливания, поэтому следует консультироваться с инженером по эксплуатации. Для увеличения тока луча напряжение экстрактора можно изменить с номинального значения до более высокой величины (не более 7 кВ). Напряжение экстрактора должно быть снижено за короткое время (1-2 часа) и не более, чем на 500В. Напряженность поля слишком низкая на наконечнике нити накаливания и может повлиять на геометрию нити накаливания и таким образом ухудшить разрешение.



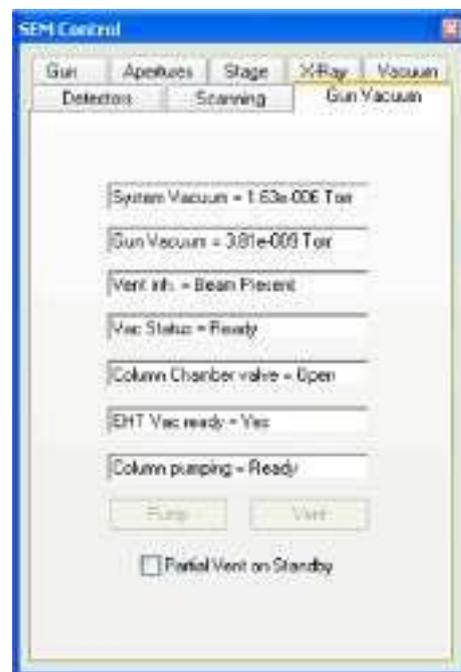
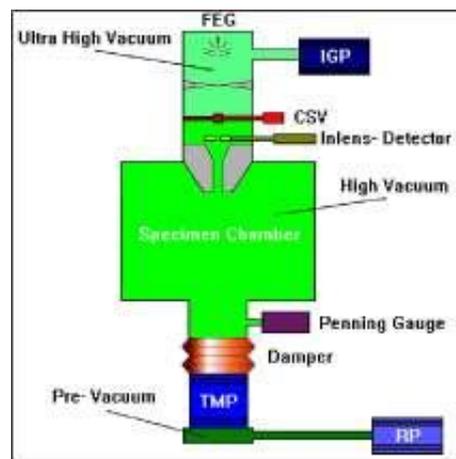
## 2.2 Система обеспечения вакуума

Микроскопы серии SUPRA и ULTRA оснащены ионным геттерным насосом (IGP), турбомолекулярным насосом (TMP) и насосом предварительного вакуума (RP). Насос TMP расположен непосредственно под камерой для образца. Для предотвращения передачи вибраций от насоса к камере образца, между ними установлен специальный гаситель. Насос предварительного вакуума напрямую подсоединен к насосу TMP с использованием виброгасителя.

При запуске процесса, насос предварительного вакуума начинает нагнетать вакуум перед входом насоса TMP. Затем увеличивается скорость вращения насоса TMP и создается заключительный вакуум. Вакуум в камере для образца измеряют с помощью манометра Пеннинга. Значение вакуума составляет  $1 \cdot 10^{-4}$  мбар. Затем клапан (CSV), отделяющий в колонне камеру для образца и зону пушки, открывается и теперь может быть включено ускоряющее напряжение.

Разделительный клапан автоматически закрывается при напуске воздуха и отделяет пушку от остальной части системы. Насос IGP постоянно работает в зоне расположения пушки. В зависимости от времени работы насоса, используемого образца и количества дополнительных компонентов, внутри камеры для образца создается вакуум величиной  $10^{-6} - 10^{-7}$  мбар.

Значения вакуума в камере для образца (*System vacuum-вакуум системы*) и в зоне расположения пушки (*Gun Vacuum - вакуум пушки*) показаны в окне контроля SEM (*SEM Control-window*). Это окно также дает возможность начать процессы откачки или вентилирования. Перед началом процесса вентилирования ускоряющее напряжение должно быть отключено. Затем процедуру вентилирования начинают нажатием кнопки *Vent*. Камеру для образца всегда следует вентилировать с использованием сухого азота, чтобы минимизировать загрязненность камеры для образца. Убедитесь, что давление на впускном клапане вентиляционной трубы составляет приблизительно 3 мбар. Если давление слишком высокое, компенсация давления в камере для образца будет происходить слишком быстро, что может неблагоприятно повлиять на дополнительные компоненты (например, окно детектора EDX).



Производительность насоса IGP через время уменьшается, вызывая, таким образом, ухудшение качества вакуума в зоне пушки. При снижении вакуума до значений, находящихся в верхней части диапазона  $10^{-9}$  ( $8 - 9 \cdot 10^{-9}$  мбар), насос IGP следует прогревать (см. 6.1). При вакууме величиной  $2 \cdot 10^{-8}$  мбар, нить накала будет автоматически отключена (аварийное отключение).

### 2.3 Детектирование

Когда первичный электронный луч падает на образец, определенные продукты взаимодействия фиксируются с помощью специальных детекторов, используемых при формировании изображения.

Чаще всего для формирования изображения в электронной микроскопии используются такие продукты взаимодействия как вторичные электроны (SE) и электроны обратного рассеяния (BSE).

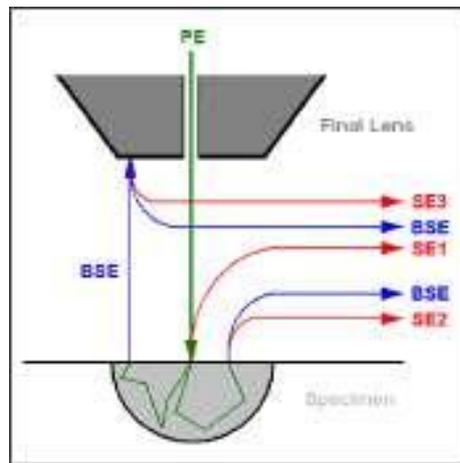
Вторичные электроны образуются вследствие неупругого рассеяния первичных электронов на ядрах атомов или на электронах электронных оболочек атомов материала образца. Вторичные электроны имеют низкую энергию (< 50 эВ). В зависимости от их происхождения и энергии, с которой они покидают образец, их можно отнести к различным группам. Три наиболее важные группы указаны ниже.

SE 1: образуются/испускаются поверхностью образца непосредственно в центральной точке

SE 2: образуются после многократного рассеяния и испускаются поверхностью вдалеке от центра луча

SE 3: генерируются электронами обратного рассеяния (BSE) в местах, удаленных от точки центра, и не несут информации, значимой при формировании изображения

Все электроны с энергией выше 50 эВ считаются электронами обратного рассеяния. Они образуются при неупругом рассеянии, в глубоко залегающих слоях области взаимодействия и несут информацию о внутренней части образца. Т.к. коэффициент обратного рассеяния сильно зависит от атомного числа материала, содержание информации, передаваемой электронами обратного рассеяния, в основном определяется так называемым контрастом материала.



В зависимости от типа прибора, детекторы устанавливаются по умолчанию, по выбору или вообще не устанавливаются на приборе (нет в наличии). Ниже приведена таблица, дающая общие представления о конфигурациях различных приборов.

прибор	Внутри линзы	SE2	BSE	EsB	VPSE
SUPRA 25	стандартные	По выбору	По выбору	Нет в наличии	Нет в наличии
SUPRA 35	стандартные	стандарт	По выбору	Нет в наличии	Стандарт с VP
SUPRA 50	стандартные	стандарт	По выбору	Нет в наличии	Стандарт с VP
SUPRA 55	стандартные	стандарт	По выбору	Нет в наличии	Стандарт с VP
SUPRA 60	стандартные	стандарт	По выбору	Нет в наличии	Стандарт с VP
ULTRA 55	стандартные	стандарт	По выбору	стандарт	Нет в наличии
ULTRA 60	стандартные	стандарт	По выбору	стандарт	Нет в наличии

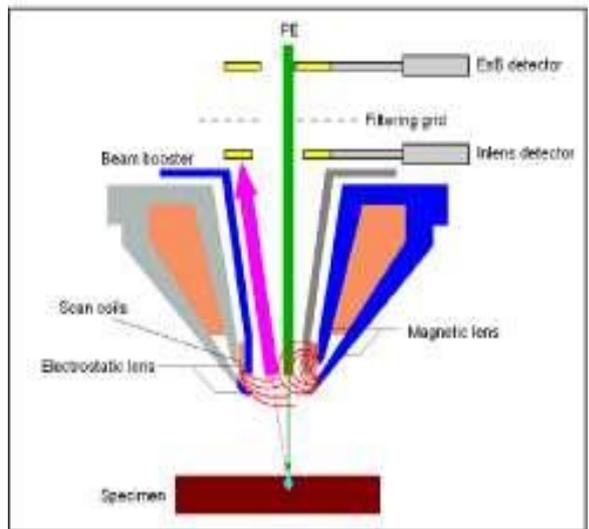
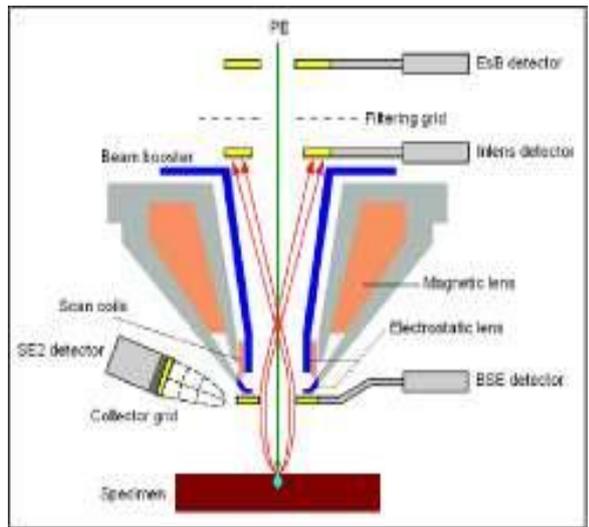
Следующие главы дают информацию о функциях различных детекторов и оптимальных условиях работы. Ниже приведенная таблица дает только общее представление об условиях применения различных детекторов:

детектор	Ускоряющее напряжение	Рабочее расстояние	Режим вакуума
Внутри линзы	100 В - 20 кВ	< 10 мм	Высокий вакуум
SE2	1 - 30 кВ	> 4 мм	Высокий вакуум
EsB	100 В- 20кВ	2- 9 мм	Высокий вакуум
BSE	5 - 30 кВ	7 - 12 мм	Высокий вакуум/VP
VPSE	5 - 30 кВ	7 - 12 мм	VP
EDX	5 - 30 кВ	8,5 мм	Высокий вакуум/VP

### 2.3.1 Встроенный в линзу детектор

Как показано в предыдущем разделе, большое количество вторичных продуктов, используемых для получения изображения, образуется при взаимодействии первичного электронного луча с материалом образца. Для отображения фактической поверхности образца, если это возможно используют вторичные (SE) электроны типа 1 и 2, т.к. это единственный вид электронов, образующихся непосредственно в или вблизи центра луча. Другая причина – это зона возбуждения. Только SE электроны – образуются в верхних слоях зоны возбуждения и поэтому содержат прямую информацию о поверхности образца.

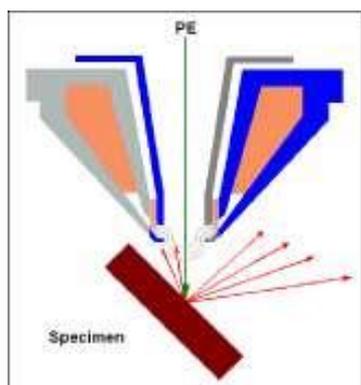
Эти электроны очень хорошо обнаруживаются с помощью детектора, встроенного в линзу, эффективность работы которого зависит от геометрического положения по отношению к траектории луча, а также от комбинации с электростатической/электромагнитной линзами. Детектор размещают над объективом, и детектирование проводят непосредственно в электронном луче. При ускоряющем напряжении  $< 20\text{кВ}$ , электроны первичного электронного луча всегда получают дополнительное ускорение величиной  $8\text{кВ}$ , проходя через электронную оптику. Такое увеличение энергии электронов обеспечивается усилителем пучка. Чтобы обеспечить попадание электронов на поверхность образца с энергией, установленной как ускоряющее напряжение, электростатическое поле создается в конце объектива и замедляет первичные электроны на  $8\text{кВ}$ . Это электростатическое поле действует как ускоряющее поле для электронов SE, образующихся на поверхности образца. Эти электроны SE поглощаются, снова ускоряются и фокусируются электромагнитным полем детектора, находящегося внутри линзы, где они ударяются о сцинтиллятор и создают вспышки, которые отклоняются от траектории луча с помощью световода для передачи их на фотоумножитель. Последние усиливаются в фотоумножителе и выходят в виде сигнала, который воспринимают электронные устройства.



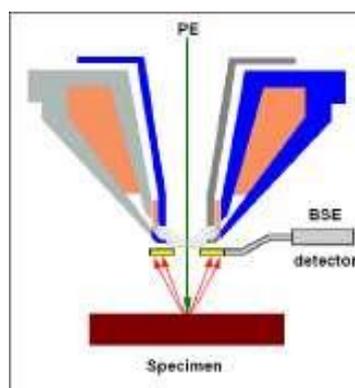
Детектор, встроенный в линзу, может использоваться при ускоряющем напряжении величиной до  $20\text{кВ}$ . При более высоких напряжениях усилитель пучка, следовательно и поле электростатической линзы отключаются. Электроны SE с низкой энергией перестанут отклоняться и получать повторное ускорение, а эффективность встроенных в линзу детекторов будет значительно снижена.

Эффективность встроенного в линзу детектора сильно зависит от электрического поля электростатической линзы. Интенсивность этого электростатического поля экспоненциально убывает с расстоянием. Рабочее расстояние является одним из наиболее важных факторов, определяющих соотношение сигнал/шум, а следовательно и эффективность детектора. В зависимости от геометрии образца и применяемого ускоряющего напряжения, приемлемое рабочее расстояние выбирают исходя из задачи. При работе с высокими ускоряющими напряжениями ( $5\text{--}20\text{кВ}$ ) часто рекомендуют установить рабочее расстояние на величину  $< 10\text{мм}$ , если геометрия образца позволяет выбрать такое расстояние. При работе с меньшими ускоряющими напряжениями, должно подбираться и соответствующее рабочее расстояние. Для напряжений в диапазоне  $1\text{--}5\text{кВ}$ , в большинстве случаев рабочее расстояние рекомендуется выбирать величиной  $< 5\text{мм}$ . Работая при очень низких энергиях взаимодействия ( $100\text{В}\text{--}1\text{кВ}$ ), рабочее расстояние не должно превышать  $4\text{мм}$ . Часто наиболее приемлемым является расстояние  $\approx 2\text{мм}$ . Т.о., на начальном участке траектории электроны с низкой энергией менее подвержены влиянию, т.к. им сообщается гораздо более высокая энергия при прохождении всей траектории луча (усилителем пучка), а при значительно более низких энергиях электроны должны пройти короткое

расстояние величиной 1-2 мм. На сигнал может оказывать влияние ориентация поверхности образца. Большой угол наклона образца влияет на угол эмиссии электронов. Лишь небольшое количество электронов будет двигаться в направлении последней линзы и эффективность детектирования будет снижена. Наименьшее возможное рабочее расстояние также часто ограничивается наклоном образца. При использовании встроенного детектора, убедитесь, что образец не слишком наклонен. Использование детекторов BSE также может влиять на эффективность работы встроенного детектора. Т.к. различные детекторы BSE устанавливают непосредственно под последней линзой (см. 2.3.4), они изменяют электростатическое поле последней линзы. С другой стороны, детектор BSE ограничивает наименьшее приемлемое рабочее расстояние, снижая, таким образом, эффективность встроенного в линзу детектора. Если для данной задачи нет необходимости использовать детектор BSE, его смещают в положение ожидания.



Изменение распределения электронов SE при наклоне образца



Ухудшение электростатического поля объектива, вызванное детектором BSE

Основным достоинством встроенного в линзу детектора является его высокая эффективность детектирования, в частности при очень низких ускоряющих напряжениях, и практически безупречное детектирование электронов SE. Он является идеальным инструментом отображения поверхности образца. Даже при высоких ускоряющих напряжениях, изображение от встроенного в линзу детектора содержит больше информации о поверхности, чем изображение от детектора SE2. Это связано с чистотой детектирования вторичных электронов (SE): сигнал встроенного в линзу детектора формируется практически исключительно по результатам детектирования вторичных электронов SE1 и SE2, и почти не происходит никакого наложения сигналов электронов обратного рассеяния или электронов SE 3-го типа (пример: см. рис. 1 и 2). При ускоряющем напряжении 10 кВ, изображение от встроенного в линзу детектора раскрывает гораздо больше структурных особенностей поверхности. На изображении, полученном от детектора SE2 (рис. 2), мелкие аспекты дают сильное излучение, т.к. глубинная информация от электронов BSE также содержится в изображении. Если на поверхности имеются очень тонкие слои, этот эффект может привести к свечению соответствующего слоя вследствие увеличения зоны возбуждения таким образом, что данный слой становится невидимым (рис. 3 и 4). Загрязненность покрытого металлом слоя четко просматривается при ускоряющем напряжении 10 кВ на изображении, полученном от встроенного в линзу детектора (рис. 3). Тот же участок, рассматриваемый с помощью детектора SE2 (рис. 4) не дает никакой информации о загрязнении.

Однако встроенный в линзу детектор часто используют при гораздо более низких ускоряющих напряжениях. Чем ниже энергия первичных электронов (PE), тем меньше область взаимодействия и глубина проникновения электронов. Чем меньше глубина проникновения электронов, тем больше доля электронов SE, испускаемых верхними слоями образца и создающими контрастность изображения. Примеры, показанные на рис. 4 и 5, соответствуют образцам с очень низким атомным числом, исследованным при напряжении 1 кВ и 5 кВ. Изображение, полученное при напряжении 1кВ, показывает четко структурированную поверхность: благодаря малой глубине проникновения даже очень маленькие структурные особенности локально создают относительно важную трансформацию сигнала и таким образом обеспечивают очень хороший контраст. На том же участке, исследованном при напряжении 5 кВ (рис. 5), видно очень важное излучение и прозрачность образца, т.к. данные получены с увеличенной зоны

возбуждения: информация получена в увеличенном диапазоне и более глубокие слои вносят вклад в контрастность. Такой эффект получают не только на материалах с низким порядковым номером, но также на материалах с высокой плотностью, однако чаще всего при несколько увеличенных ускоряющих напряжениях. Рис. 7 и 8 иллюстрируют этот эффект на образцах с относительно высоким атомным числом. Изображение, полученное при 1 кВ (рис.7), снова очень хорошо показывает структуру поверхности. Однако анализ кристаллита при 15 кВ (рис. 8) обеспечивает тот же эффект. Контрастность ухудшается и кажется, что образец освещен и является прозрачным. Мелкие особенности структуры не обнаруживаются или появляются элементы структуры (фон кристаллита), которых нет на поверхности кристаллита, и которые являются особенностями внутренней части образца. Рисунки 13- 16 также демонстрируют этот эффект. На рис. 13 показан образец при ускоряющем напряжении только 200 В. Изображение получено при однородной освещенности и хорошем контрасте поверхности. Увеличение ускоряющего напряжения на 1 кВ (рис. 14) приводит к увеличению краевого эффекта и изменению контрастности некоторых очень мелких структур. При работе с ускоряющим напряжением 5 кВ (рис. 15), контрастность некоторых структурных особенностей на поверхности образца даже является обратной. Мелкие структурные компоненты чрезмерно освещены и кажутся прозрачными. При первичной энергии электронов величиной 10 кВ (рис. 16), электроны проникают так глубоко, что различимы только очертания поверхности, все изображение похоже на стекло. Основная часть контрастности формируется в гораздо более глубоких слоях: изменения сигнала, вызванные мелкими особенностями поверхности, накладываются и компенсируют друг друга.

Другая причина применения очень низких ускоряющих напряжений – это минимизация и компенсация зарядов и излучений поверхности образца. Если электроны сталкиваются с непроводящими или частично проводящими образцами, они собираются на поверхности, т.к. вследствие плохой проводимости заряд не происходит. Образуются локализованные заряды, создающие влияние на электронный пучок и способные сильно ухудшить качество изображения. Однако можно уменьшить или компенсировать этот эффект уменьшая первичную энергию электронов и зондового тока (*размер апертуры-Aperture size*). Это показано на рис. 17 и 18. На поверхности диатомы, рассматриваемой при 7 кВ (рис. 17), наблюдается сильный краевой эффект и свечение структуры, вызывающее значительное ухудшение изображения. Снижение энергии взаимодействия до 1 кВ (рис. 18) позволяет избежать такого свечения, обеспечивая, т.о., однородную освещенность изображения.

Т.к. встроенный в линзу детектор исследует поверхность сверху, изображения часто кажутся плоскими, вследствие того, что они характеризуются относительно небольшим топографическим контрастом, свойственным этому направлению наблюдения (см. рис. 9 - 12). Изображение поверхности разрушения, полученное с помощью встроенного в линзу детектора (рис. 9) характеризуется резко выраженным краевым эффектом и дает хорошую информацию о поверхности. Однако топографический образ относительно слабый. Изображение, полученное с помощью детектора SE2 (рис. 10), характеризуется преобладанием топографического контраста, т.к. контраст поверхностей, наклоненных в направлении детектора, выше, а контраст других поверхностей – ниже. Поверхность осколка демонстрирует аналогичный пример. Изображение от встроенного детектора (рис. 11) кажется относительно плоским, но даже при 15 кВ обнаруживаются структурные особенности поверхности. На изображении от детектора SE2 (рис. 12) выделяется топография. Электроны проникают глубже, и большее количество электронов BSE вносит вклад в контрастность. Поэтому, тонкие слои излучают и невидимы, вследствие возникающих токов. Если пользователю нужно получать оба вида информации на одном изображении, это осуществляется наложением изображений. В большинстве случаев, встроенный в линзу детектор не является подходящим источником сигнала для исследования при малом увеличении. С другой стороны, должно использоваться относительно небольшое рабочее расстояние, которое, однако, ограничивает выбор наименьшего возможного увеличения. С другой стороны, при очень слабом увеличении в центре поля изображения может появляться небольшое пятно. В этом случае параметры выбирают таким образом, чтобы визуализировалось окно встроенного в линзу детектора. Этот эффект сильно зависит от геометрии образца, рабочего расстояния и ускоряющего напряжения. Поэтому, при обзоре должны использоваться детекторы SE2, например, при сканировании образца или при очень больших рабочих расстояниях.

В таблице показаны некоторые стандартные значения и информация по использованию встроенного в линзу детектора. Следующие изображения иллюстрируют выше описанные факты.

Параметр	Рекомендуемые условия/ аннотации
<b>Ускоряющее напряжение:</b> 100 В до 20 кВ  100 В до 3 кВ  3 кВ до 10 кВ  1-кВ до 20 кВ	В принципе, можно выбирать до 20кВ. При напряжении больше 20 кВ усилитель пучка отключится. Режимы с низким напряжением, используемые для компенсации зарядов и для построения поверхностно-чувствительных изображений. Диапазон средних значений напряжения подходит для многих других применений. Диапазон напряжений часто используют в целях аналитического анализа
<b>Рабочие расстояния:</b> < 10 мм 2 – 3 мм 3 – 6 мм	Вследствие зависимости от электростатического поля объектива, рабочее расстояние должно быть как можно меньше. Для низких напряжений (100В-3кВ). Полезно для диапазона средних значений (3-10 кВ)
<b>Апертура :</b> 30 мкм 7,5 – 20 мкм  60 – 120 мкм	Стандартную апертуру рекомендуют для различных назначений. Ограничения тока зонда для компенсации зарядов или для анализа образцов, чувствительных к пучку. Вообще, рекоменбуется для аналитических задач.
<b>Наклон образца:</b>	Если возможно, избегать сильного наклона
<b>Рабочий режим:</b>	Только для высокого вакуума, т.к. усилитель луча не действует в режиме VP. Детекторы BSE, установленные под объективом, влияют на поле электростатической линзы!!!

Сравнение информации о поверхности, полученной от встроенного детектора и детектора SE2 при высоких ускоряющих напряжениях:

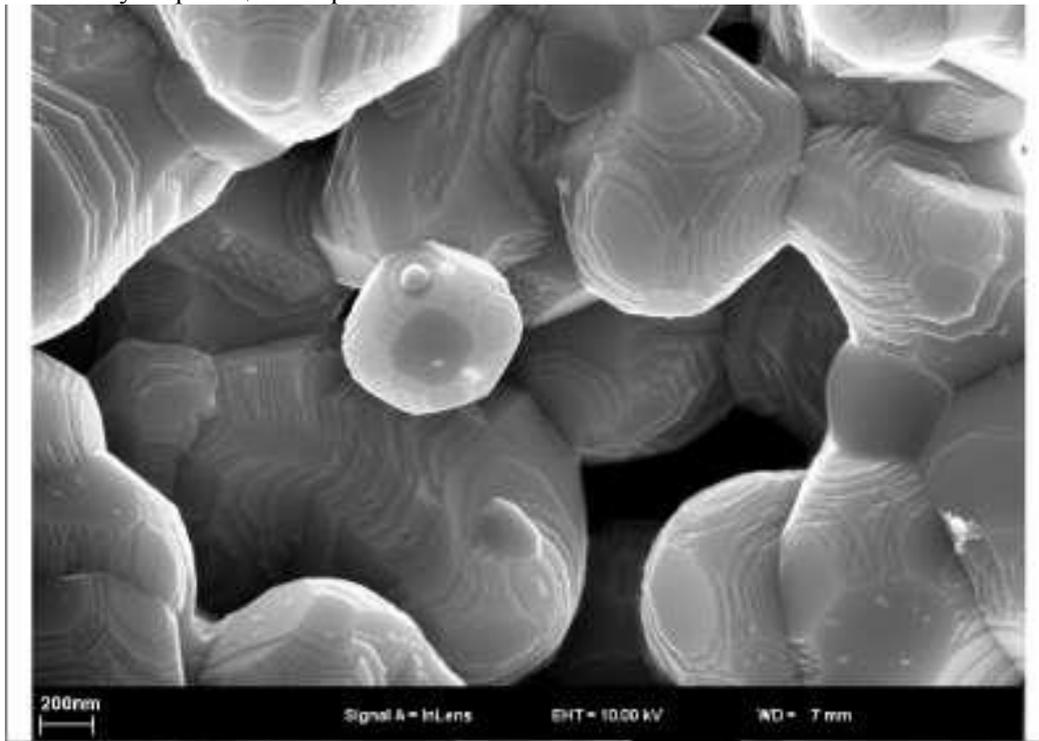


Рис. 1: резко выраженный краевой эффект при хорошем качестве изображения структуры поверхности

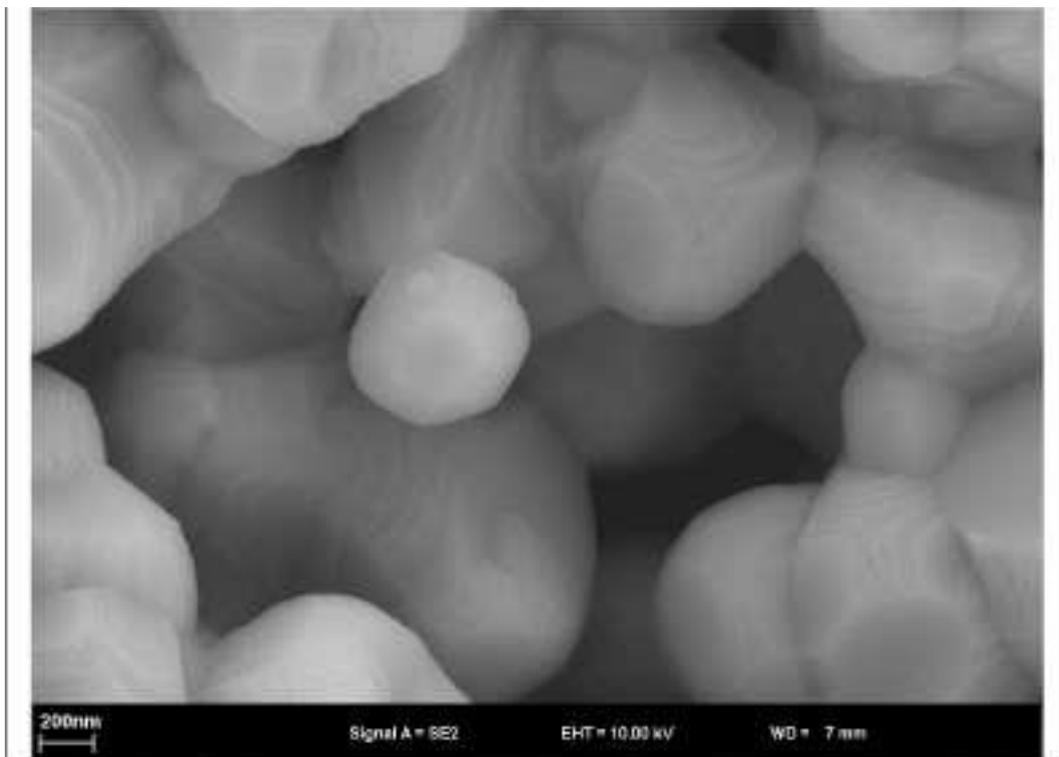


Рис.2: однородное излучение по всей ширине образца, не достаточно информации о поверхности

Сравнение информации о поверхности, полученной от встроенного в линзу детектора и детектора SE2 при высоких ускоряющих напряжениях

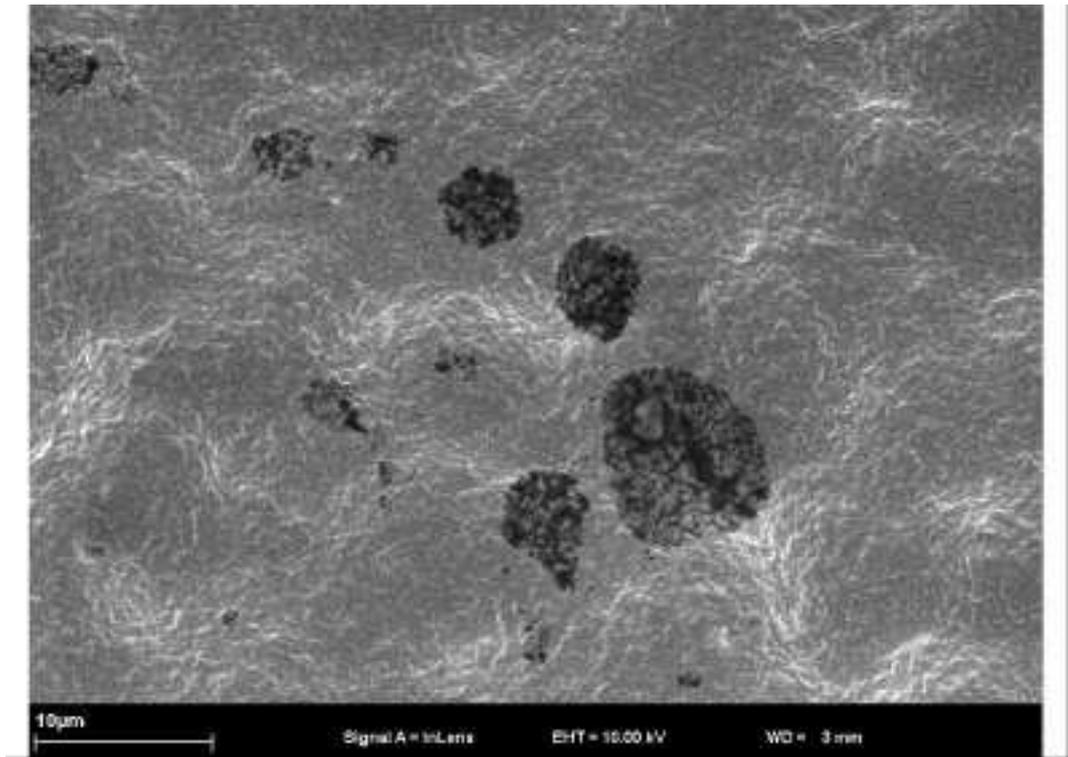


Рис. 3: тонкие слои на поверхности

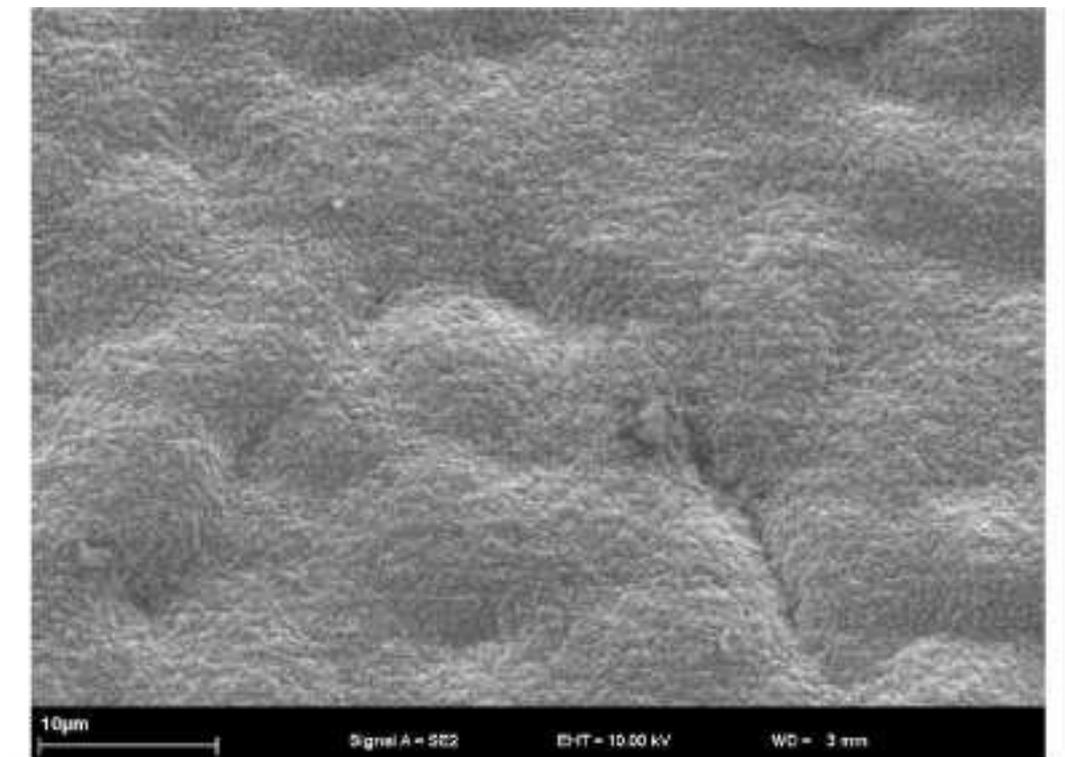


Рис. 4: слои излучают и не видимы

Сравнение информации о поверхности, полученной от встроенного в линзу детектора при 1кВ и 5 кВ, на образце с низким атомным числом

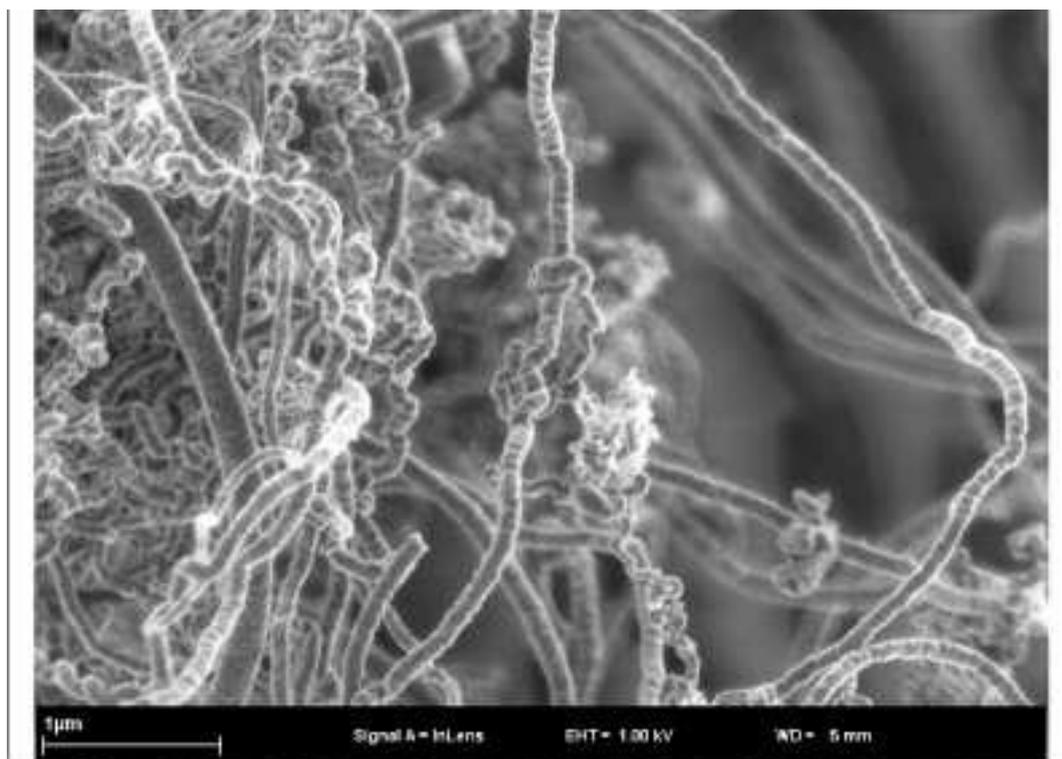


Рис. 5: хорошее поверхностно чувствительное изображение при 1 кВ

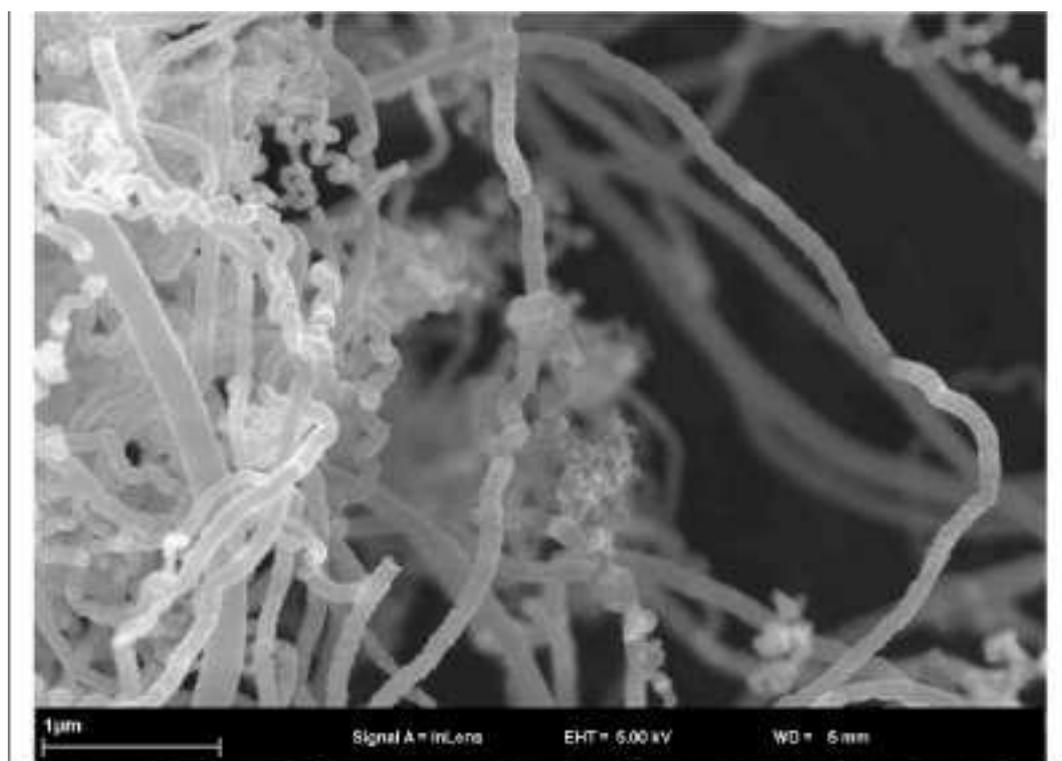


Рис.6: прозрачная поверхность, обусловленная увеличением глубины проникновения

Сравнение информации о поверхности, полученной от встроенного в линзу детектора при 1 кВ и 15 кВ, на образце с высоким атомным числом

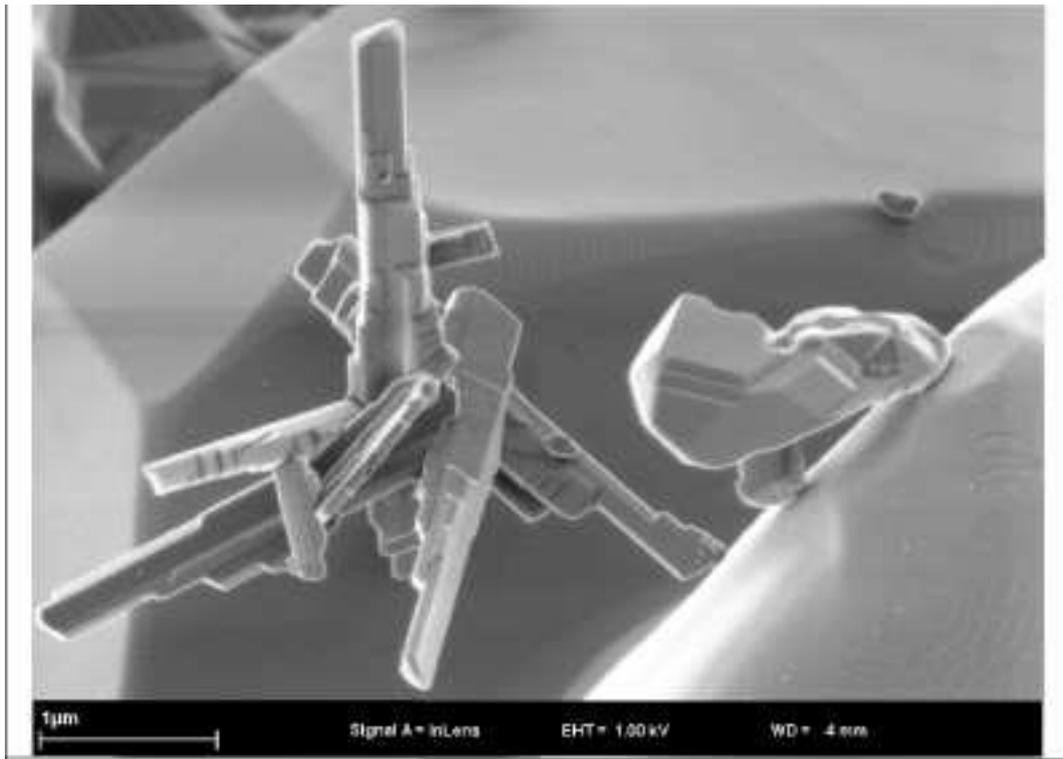


Рис. 7: хорошее поверхностно-чувствительное отображение при 1 кВ

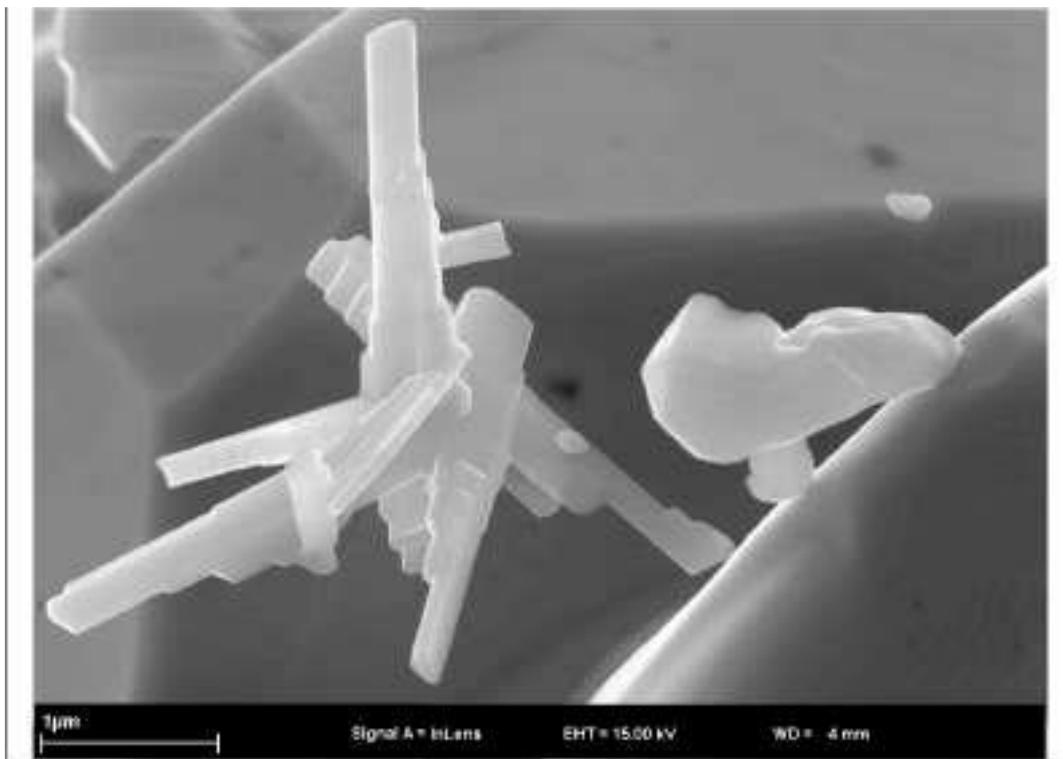


Рис. 8: прозрачная поверхность, обусловленная увеличением глубины проникновения

Рис. 9: резко выраженный краевой эффект, низкий топографический контраст

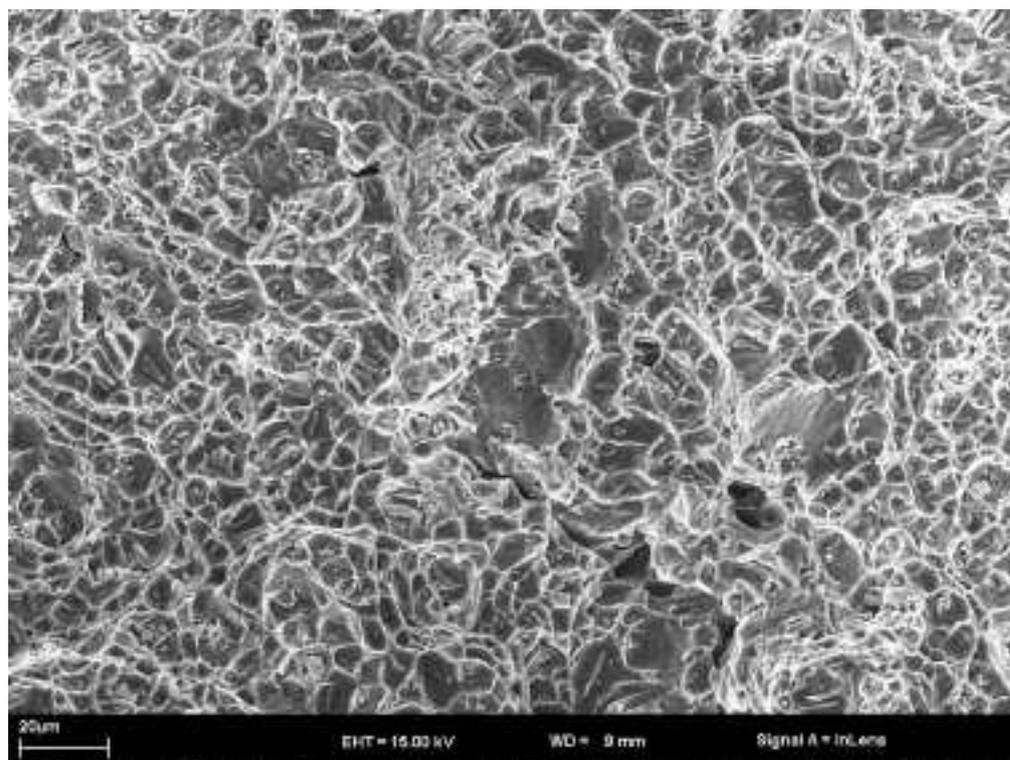
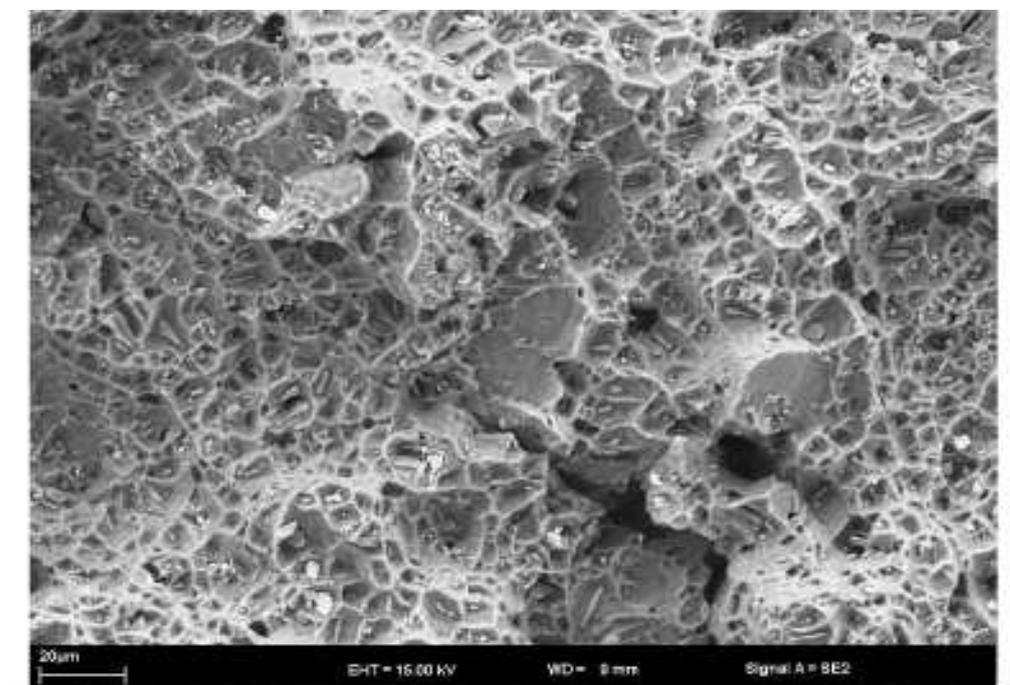


Рис. 10: хорошее топографическое отображение поверхности



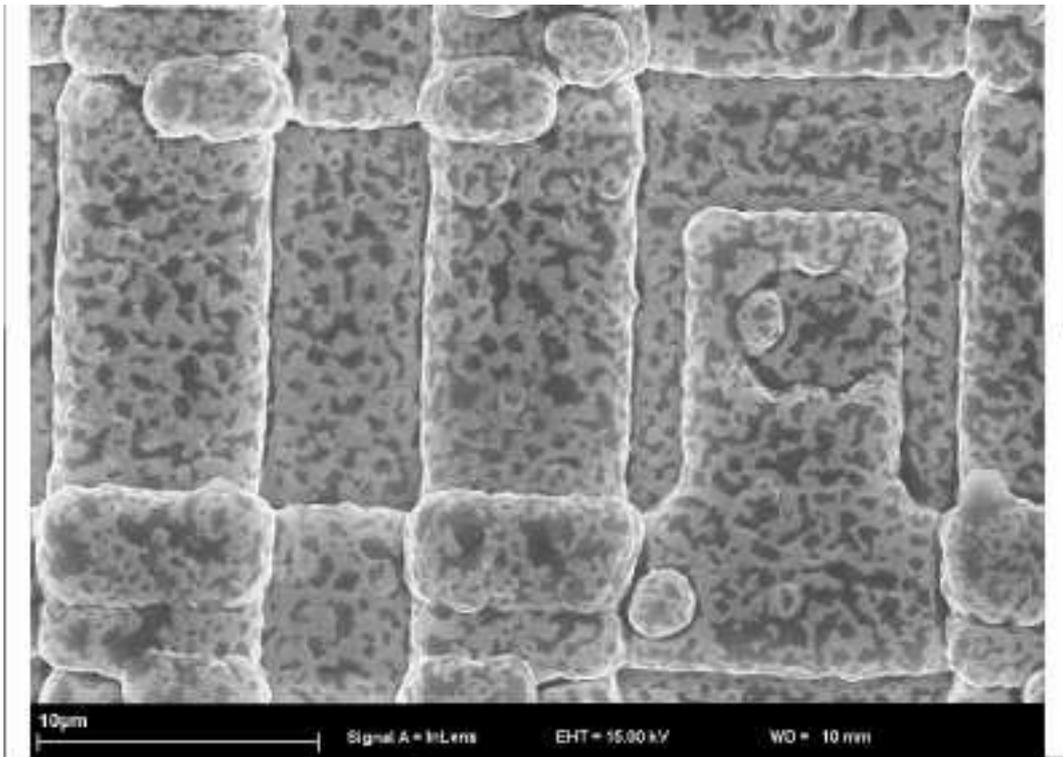


Рис. 11: хорошее отображение структуры поверхности, низкий уровень топографического контраста

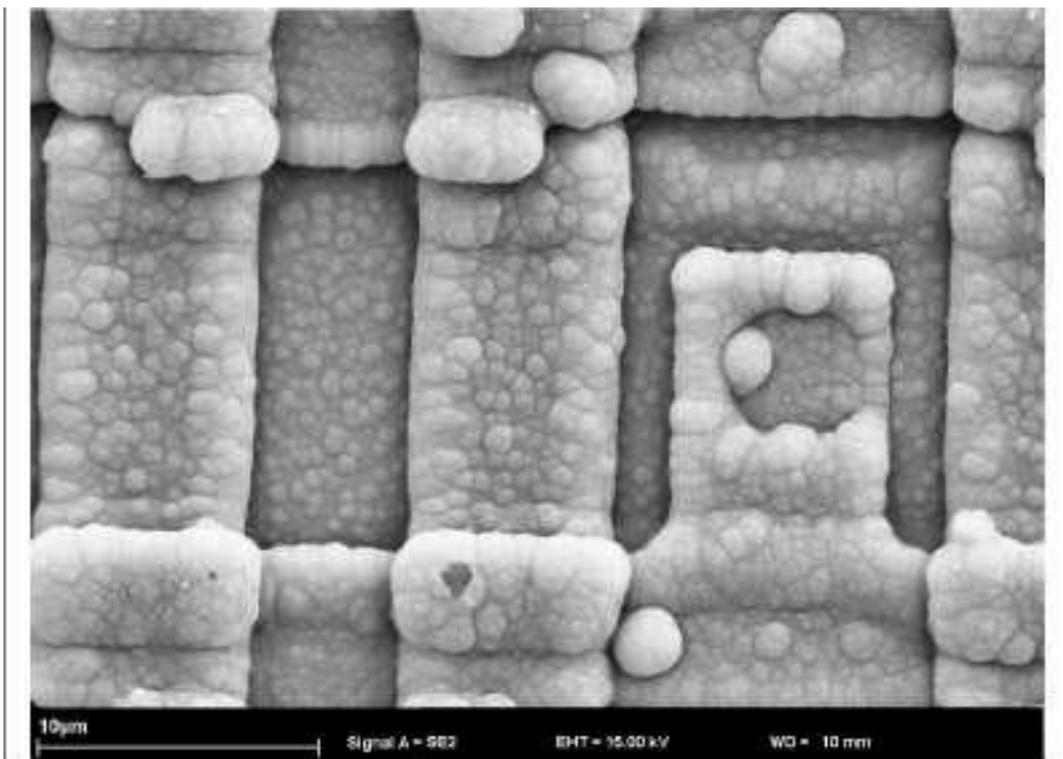


Рис. 12: хорошее отображение поверхности

Сравнение информации о поверхности, полученной от встроенного в линзу детектора при различных ускоряющих напряжениях

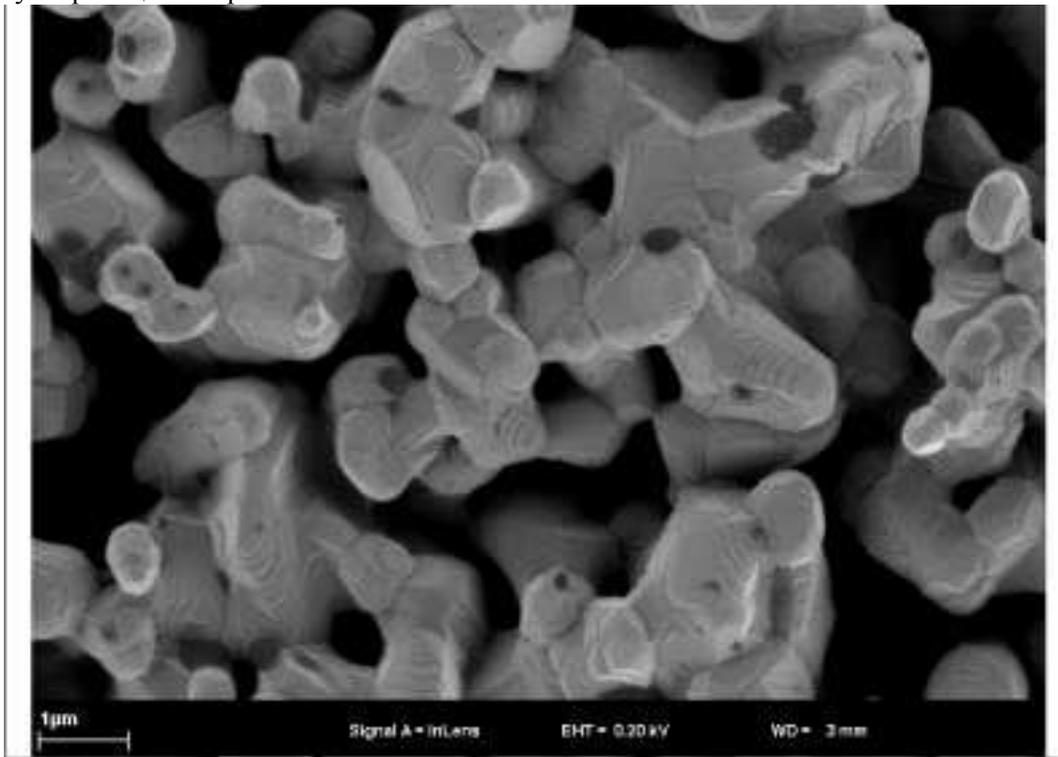


Рис. 13: однородная освещенность, отображение фактической поверхности

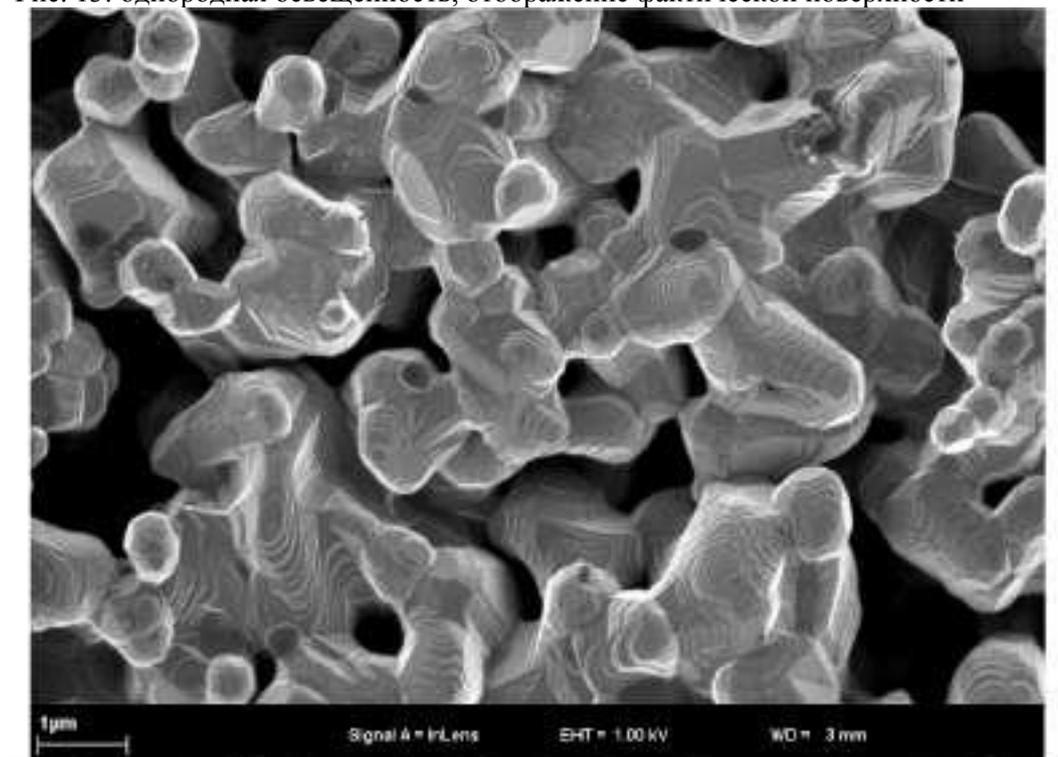


Рис. 14: усиливающийся краевой эффект

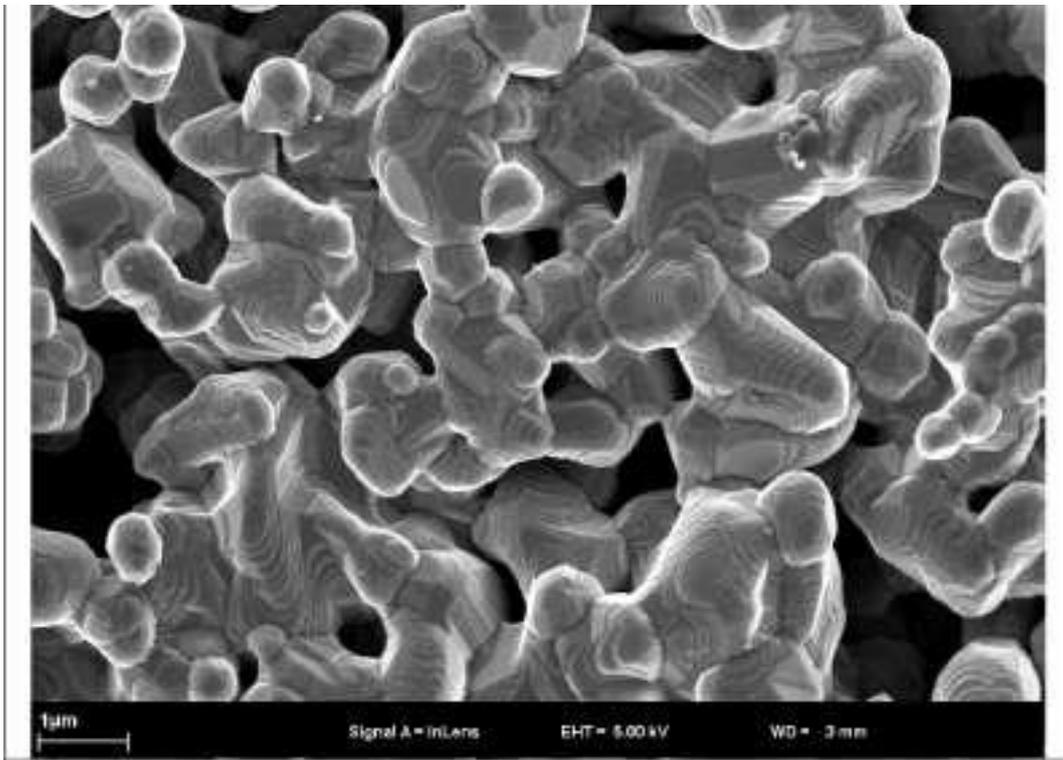


Рис. 15: усиливающийся краевой эффект, обратная контрастность некоторых структур

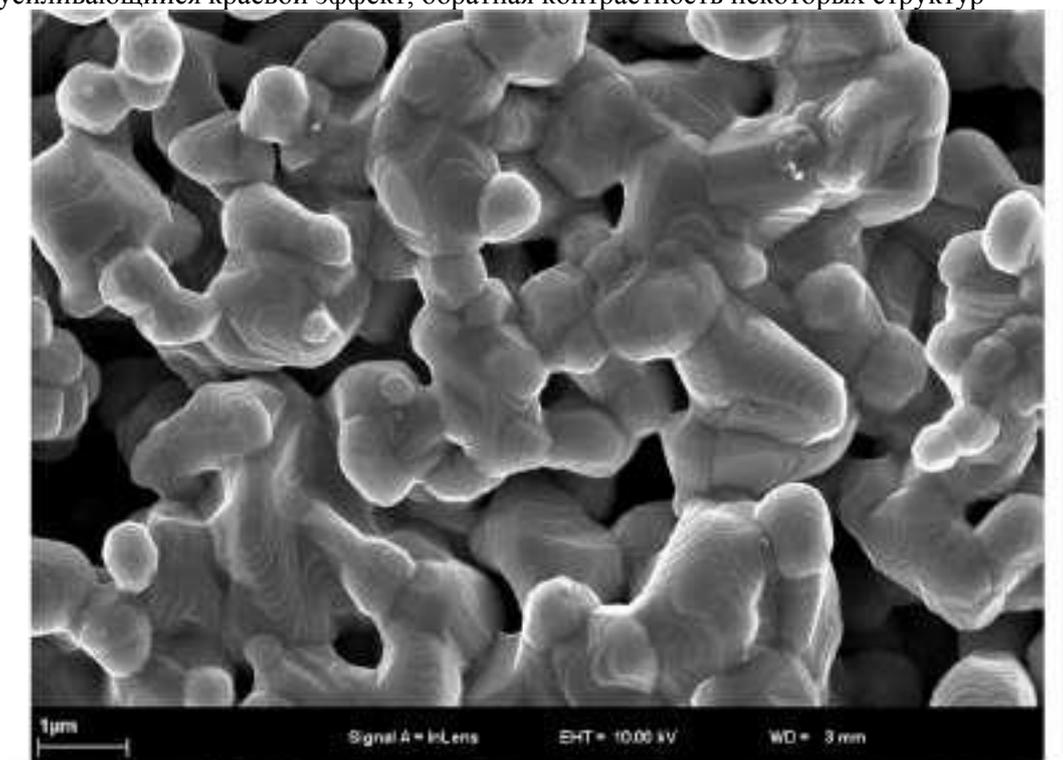


Рис.16: прозрачная поверхность вследствие увеличения глубины проникновения

Компенсация зарядов/ излучения используя более низкие ускоряющие напряжения

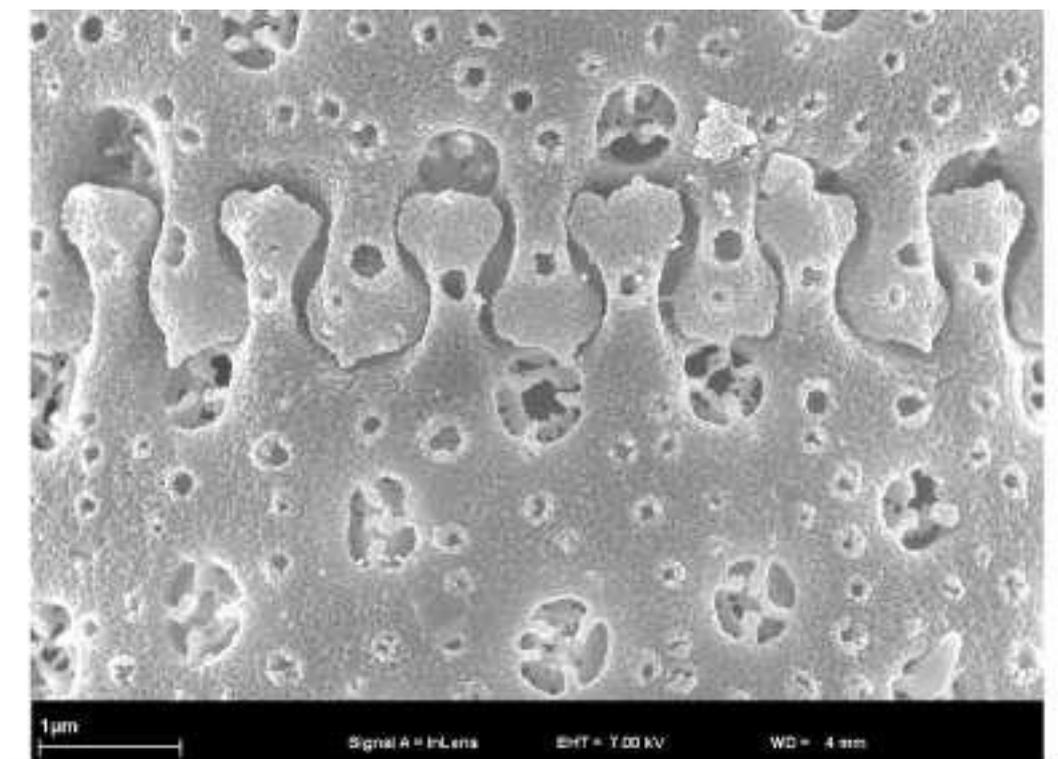


Рис. 17: четко выраженное излучение при высоком напряжении

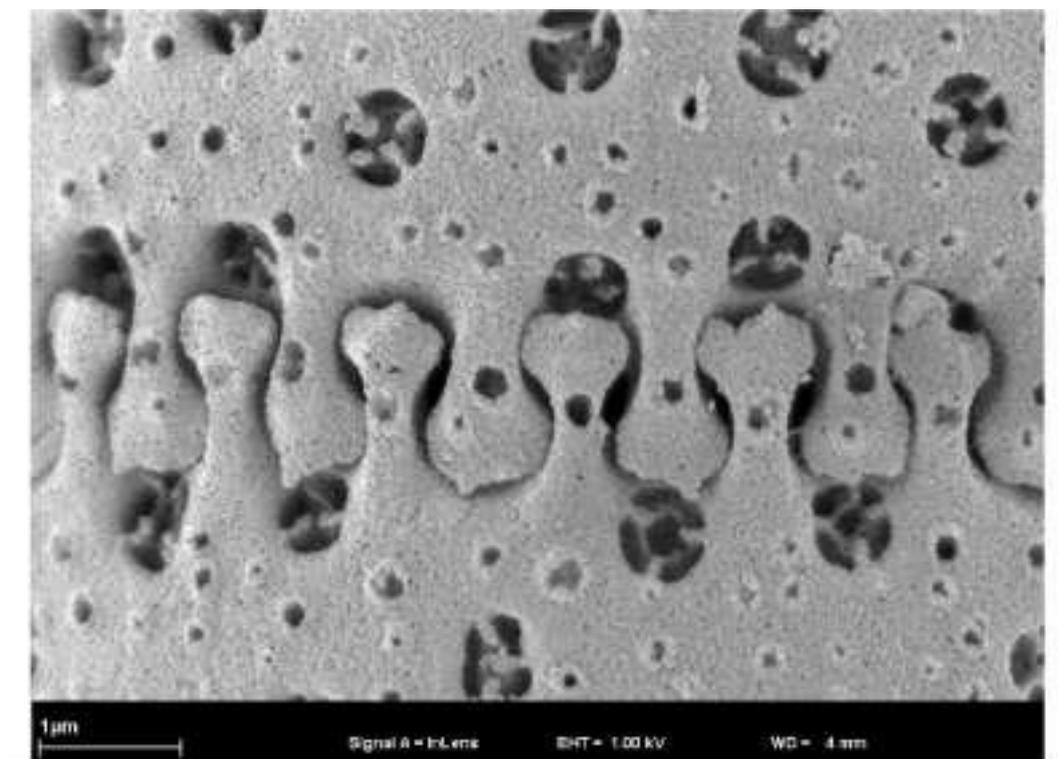


Рис. 18: однородная освещенность изображения

### 2.3.2 Детектор SE2

Второй адаптированный детектор – это SE2 или детектор Эверхарда-Тонли, установленный на стенке камеры для образца и поэтому называется камерным детектором. Т.к. он находится на стенке камеры, он исследует боковую поверхность образца. Детектор SE2 регистрирует вторичные электроны и электроны обратного рассеяния. Принцип работы показан на нижнем рисунке. Электроны, движущиеся к детектору, поглощаются коллектором и направляются к сцинтиллятору, где они ускоряются потенциалом напряжения сцинтиллятора. Когда электроны с высокой энергией ударяются о слой сцинтиллятора, внутри него возникают вспышки. Из вакуумной системы вспышки по световодам передаются на фотоумножитель для преобразования информации и передачи в виде электронного сигнала.

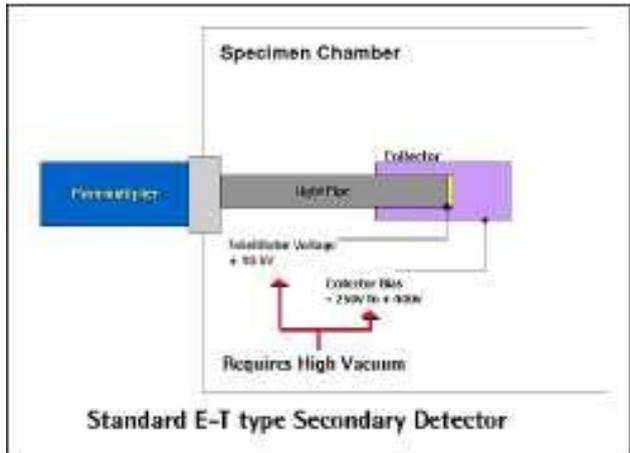
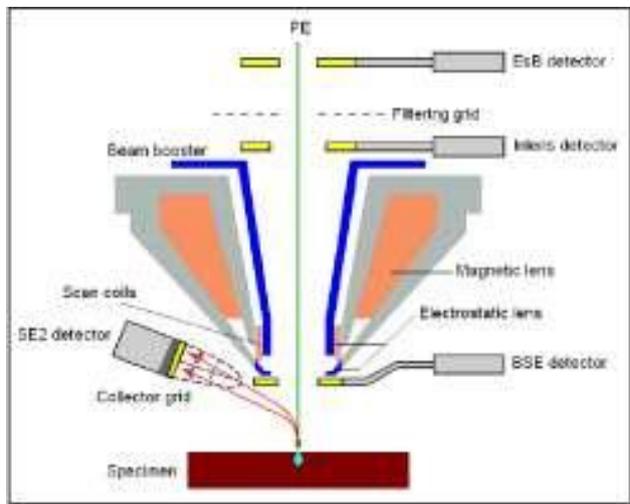
Напряжение коллектора (напряжение всасывания) может изменяться в диапазоне от -250В до +400В с шагом изменения значения 1В. напряжение коллектора контролируется в окне контроля детекторов СЭМ (*Detectors SEM Control*) с помощью параметра электрическое смещение коллектора (*Collector Bias*). Электрическое поле отклоняет (поглощает) SE электроны с низкой энергией, которые не движутся непосредственно в сторону детектора

и ускоряет их в направлении сцинтиллятора. Т.о., они обнаруживаются в увеличенном пространственном угле, а точность детектирования повышается. Для всех стандартных сфер применения это значение соответствует 300В.

Однако, электрическое поле непосредственно вблизи первичного электронного луча воздействует на этот луч. Поэтому, при более сильном увеличении рекомендуется установить напряжение коллектора таким, чтобы получить оптимальное преобразование сигнала. Т.к. напряжение на коллекторе также влияет на соотношение SE/BSE, возможно, будет полезно работать на более низких напряжениях (50-150В), чтобы снизить излучение при анализе поверхностей с высокой топографией.

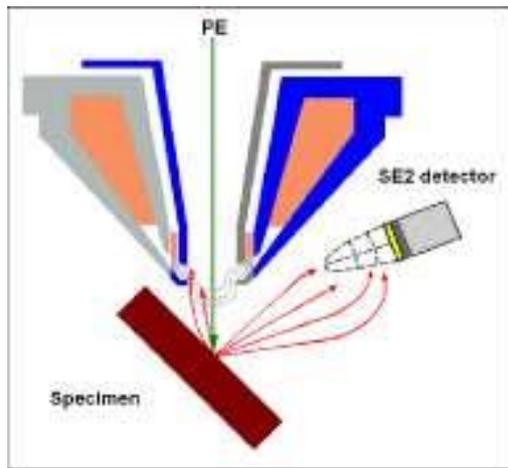
Можно установить отрицательные значения напряжения коллектора. При этом создается поле, отклоняющее SE электроны с низкой энергией так, что они не попадают на сцинтиллятор и не влияют на сигнал. Только BSE электроны, имеющие высокую энергию, на которые указанное поле влияет незначительно, достигают сцинтиллятора и учувствуют в формировании изображения. Т.о. можно получить так называемое изображение псевдо-обратного рассеяния с очень четкой топографией, которое, однако, сильно стирает свойства поверхности и контрастность материала. Такие карты с очень четкой топографией также можно получить с помощью детекторов BSE (2.3.4), хотя они не имеют характеризующих поверхность затенений, которые создаются детектором SE2. примеры показаны на рисунках 19 и 20. Рис. 19 получен при напряжении коллектора 300В. Изображение имеет хороший топографический контраст, на нем различаются мелкие структурные особенности поверхности. Поверхности, наклоненные в направлении детекторов, имеют четкий контур, однако отсутствуют тени. На рис. 20 показан тот же образец при напряжении коллектора -150 В. Хороший топографический контраст создан в основном сильным затенением. Мелкие структурные особенности скрыты.

В отличие от встроенного в линзу детектора, который вследствие зависимости от усилителя пучка можно использовать только при ускоряющем напряжении, не превышающем 20кВ, детектор SE2 в основном используется во всем диапазоне высоких напряжений. Однако, имеются ограничения, связанные с принципом детектирования и геометрическим положением детектора, что обязательно следует учитывать при работе с этим детектором. Если энергия первичных электронов очень низкая, эффективность детектора SE2 снижается. Т.к. при очень низких ускоряющих напряжениях нужны маленькие рабочие

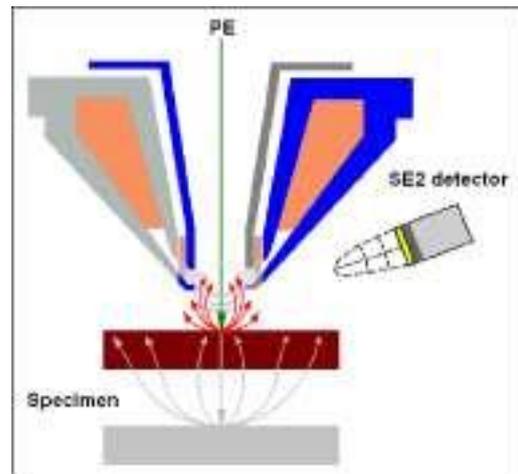


расстояния, возникают теневые эффекты, снижающие эффективность детектора. В зависимости от материала образца и выхода электронов, рекомендуемый для детектора SE2 нижний предел ускоряющего напряжения составляет прибл. 1кВ. Ниже этого предельного значения сигнал на выходе слабый и соотношение сигнал/шум слишком мало, чтобы использоваться для корректной оценки. Когда исследуемый материал имеет очень низкое атомное число (напр., полимеры), может случиться, что удовлетворительное значение соотношения можно получить только когда установлены более высокие напряжения возбуждения (2-3 кВ).

Хотя детектор SE2 не предназначен для работы при очень низких напряжениях, часто рекомендуется использовать его в среднем или низком диапазоне напряжений, для того, чтобы максимальное возможный объем информации о поверхности. Это показано на рис. 21 - 24. На одной и той же поверхности четко видны осажденные частицы при 1кв (рис. 21), при осмотре того же участка при энергии возбуждения 10кв (рис. 22), тонкие слои становятся невидимыми вследствие увеличения глубины проникновения. Рис. 24 показывает образец, исследуемый при очень высоком ускоряющем напряжении 15 кВ. такое изображение несет очень мало информации, т.к. при высоком напряжении тонкие структуры светятся. Сильно проявляется так называемый краевой эффект. Когда тот же образец исследуют при ускоряющем напряжении 5 кВ (рис. 23), краевой эффект уменьшается и поверхность отображается очень четко, т.к. первичные электроны проникают не так глубоко.



характер распространения электронов SE и BSE при наклоне образца



Зависимость эффективности детектора SE2 от рабочего расстояния

Рабочее расстояние – еще один важнейший параметр, сильно влияющий на качество детектирования. Как указывалось выше, эффекты затенения возникают, когда рабочие расстояния при использовании детектора SE2 слишком малы. Если образец расположен слишком близко от последней линзы, большинство электронов будут отклоняться под действием электрического поля электростатической линзы или будут двигаться к последней линзе, т.е. они не будут обнаруживаться детектором SE2. В зависимости от материала образца и геометрии образца, рекомендуемое минимальное рабочее расстояние составляет прибл. 4мм. Рабочие расстояния меньше указанного в большинстве случаев приведут к сильной потере сигнала. С другой стороны, этот детектор идеально подходит для очень больших рабочих расстояний. В частности, это важно при малых увеличениях, используемых для ориентации держателя образца или для перемещения исследуемого образца. Если в камеру для образца устанавливают новый образец, в этом случае часто рекомендуют установить начальное рабочее расстояние 10-20 мм, ускоряющее напряжение прибл. 10 кВ (если возможно) и использовать детектор SE2 в качестве источника сигнала. Такая конфигурация настроек позволяет установить минимальное увеличение 20x, при котором обеспечивается хорошая ориентация образца или держателя образца. Когда для образца определен соответствующий диапазон, можно установить рекомендуемые значения параметров, приемлемые для данного назначения. На рис. 25 и 26 показано, как наименьшее возможное увеличение зависит от рабочего расстояния. Когда рабочее расстояние 30 мм, а ускоряющее напряжение 10 кВ (рис. 25), детектор SE2 обеспечивает достаточно хорошее соотношение сигнал/шум. При этом можно установить минимальное увеличение, при котором становятся видны несколько миллиметров образца. При значительно меньших рабочих расстояниях (рис. 26) сильно ослабляется маломощное увеличение.

Хотя при детектировании с помощью детектора SE2 всегда задействованы электроны BSE, этот детектор можно использовать только для демонстрации контраста материала. Это связано с распределением электронов SE и BSE по всему изображению. Если детектор используют в стандартных условиях, 90% сигнала создается электронами SE и только 10% сигнала формируется электронами BSE. Поэтому, полученное изображение в большей степени – это изображение SE (см. рис. 27 и 28 – изображение полированного образца). На рисунке 27 представлена информация, полученная от детектора SE2. контраст материала практически невидимый. Это следует учитывать, однако, вследствие того, что поверхность

образца полированная, коэффициент вторичной эмиссии электронов SE снижен. Поэтому соотношение SE/BSE смещается в пользу электронов BSE. Рис. 28, полученный с помощью детектора BSE, характеризуется значительной контрастностью материала. Если применение связано контрастностью материала, рекомендуется использовать детектор BSE.

Когда детектор SE2 установлен на стенке камеры для образца, наблюдение всегда ведется сбоку, т.е. изображения предоставляют превосходную информацию о поверхности образца. Все остальные детекторы (BSE, встроенный в линзу, EsB) рассматривают образец сверху, поэтому топографическая информация является второстепенной. Рис. 29 показывает структуру излома, изображение получено с помощью детектора SE2. Изображение характеризуется хорошим топографическим контрастом. Поверхности, наклоненные в сторону детектора - более яркие, поверхности, наклоненные в противоположную сторону от детектора – темнее. Изображение, полученное с помощью детектора BSE (рис. 30) освещено равномерно, т.е. эффект трехмерного восприятия сильно подавлен. Контрастность материала, однако, очень четкая. Т.к. во многих случаях важна не только полная информация о поверхности и контраст материала, но также и трехмерная информация, часто рекомендуют создавать смешанные изображения, содержащие определенную долю информации, полученной от детектора SE.

Наклон образца увеличивает сигнал детектора SE2, а иногда и топографию, когда наклон оси предметного столика ориентирован в сторону детектора SE2. Наклоном поверхность образца в направлении детектора изменяют пространственный угол, в котором происходит испускание с поверхности образца электронов SE и BSE. Т.к. сильный наклон образца нежелателен для других детекторов, образцы наклоняют только в тех случаях, когда это необходимо для решения прикладной задачи.

В таблице, приведенной ниже, даны стандартные значения и примечания, касающиеся работы детектора SE2. Рисунки приведены в качестве примеров, иллюстрирующих вышеуказанные факты.

Параметр	Рекомендуемые условия/ комментарии
<b>Ускоряющее напряжение:</b> 100В – 30кВ  1кВ – 5кВ  5кВ – 20кВ 20кВ – 30кВ	В принципе, подходит для всего диапазона высоких напряжений, однако, достаточное соотношение сигнал/шум в большинстве случаев достигается в основном после 1кВ. Низкие напряжения применяются для компенсации зарядов и излучения и для создания поверхностно-чувствительных изображений. Средний диапазон напряжений рекомендуется во многих случаях. Диапазон напряжений часто используют в аналитической работе
<b>Рабочее расстояние:</b>  > 4мм  4- 6 мм 6 – 12 мм 12 – 30 мм	Если рабочее расстояние слишком маленькое, будут возникать эффекты затенения, снижающие эффективность детектора. Ниже значения 20кВ электроны SE поглощаются полем электростатической линзы. При работе на низких напряжениях (1кВ – 5кВ). Рекомендуется для среднего диапазона напряжений (5-20кВ). Часто рекомендуется только для слабого увеличения или для увеличения глубины поля.
<b>Напряжение на коллекторе:</b> 300В – 400В -150В – 0В	Стандартное значение напряжения коллектора. Изменение напряжения на коллекторе при сильном увеличении для получения оптического сигнала; часто, уменьшая напряжение на коллекторе можно снизить излучение для псевдо BSE электронов
<b>Апертура:</b> 30 мкм 7,5 до 20 мкм  60 и 120 мкм	Стандартная апертура рекомендуется для многих случаев. Ограничения по зондовому току для компенсации зарядов или улучшения глубины фокуса при анализе чувствительный к лучу образцов. Часто рекомендуется только для обзорного увеличения или аналитических задач
<b>Наклон образца:</b>	Наклон в направлении детектора изменит угол выхода электронов SE и BSE и , т.о., усилит сигнал на детекторе SE2
<b>Рабочий режим:</b>	Только для высокого вакуума, т.к. напряжение сцинтиллятора отключается в режиме VP

Сравнение изображений от детектора SE2, полученных при положительном и отрицательном напряжениях коллектора



Рис. 19: хорошее изображение поверхностной структуры и топографии



Рис.20: очень четкая топография, включая затенения

Сравнение информации о поверхности, полученной с помощью детектора SE2 при различных ускоряющих напряжениях

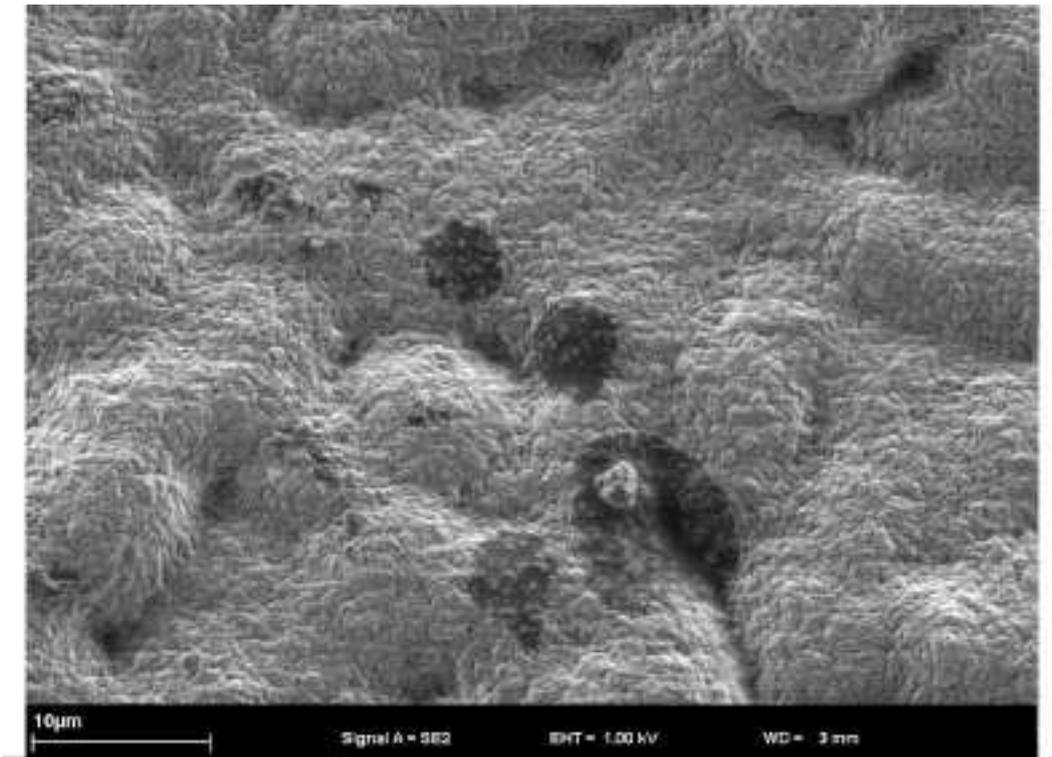


Рис. 21: хорошее поверхностно-чувствительное изображение при 1кВ

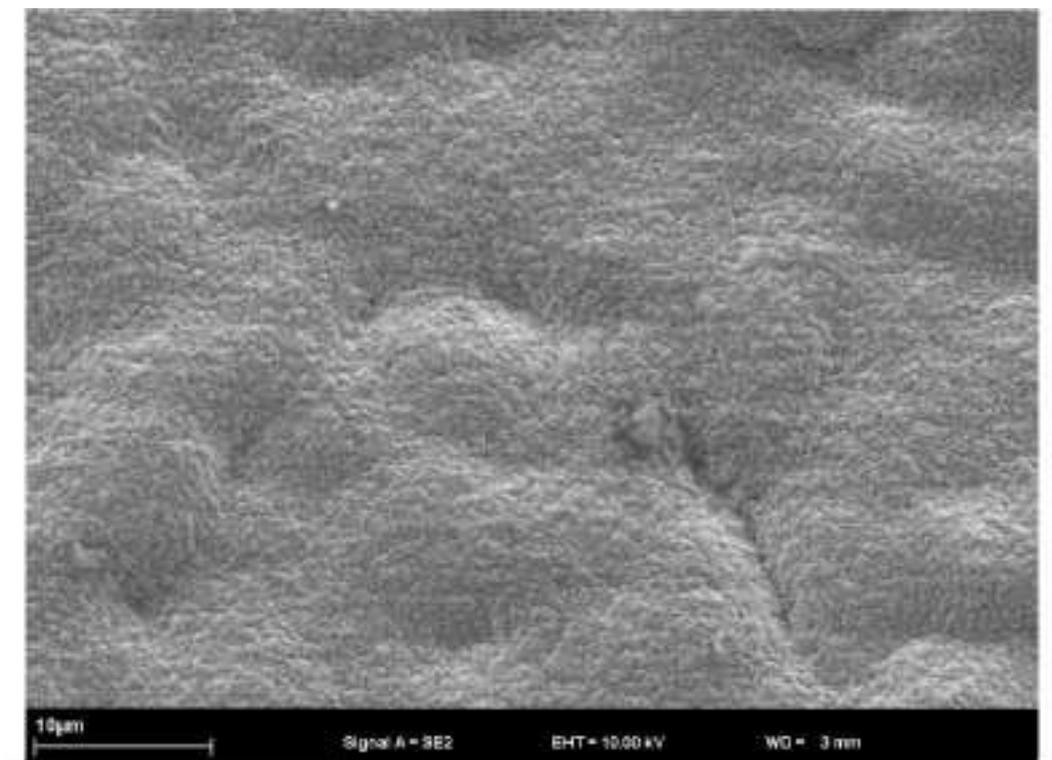


Рис. 22: свечение тонких слоев вследствие высокой энергии

Сравнение информации о поверхности, полученной от детектора SE2 при различных ускоряющих напряжениях

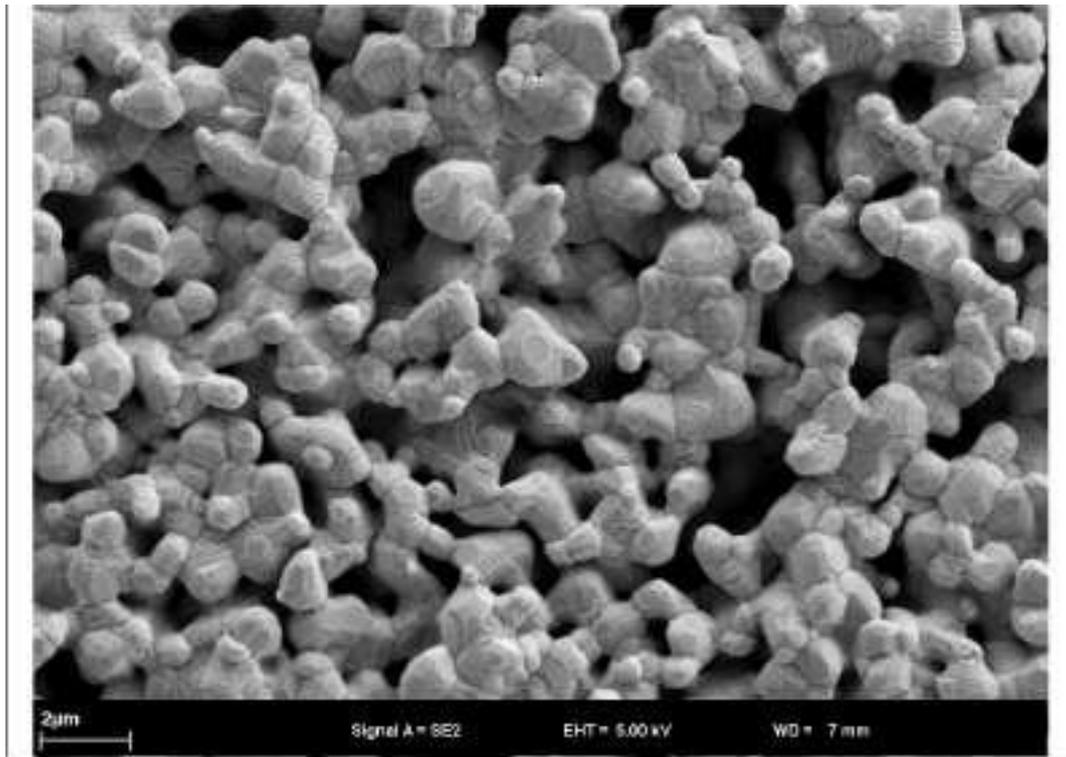


Рис. 23: хорошее поверхностно-чувствительное изображение поверхности при 5кВ

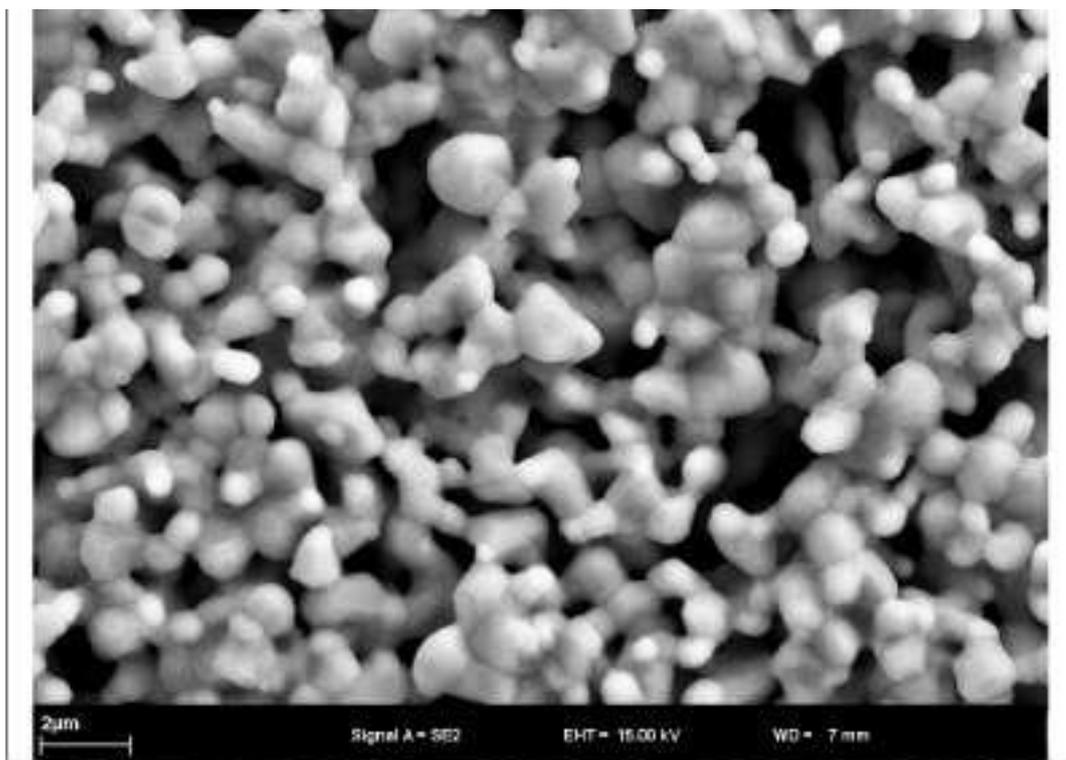


Рис. 24: прозрачность поверхности вследствие увеличения глубины проникновения

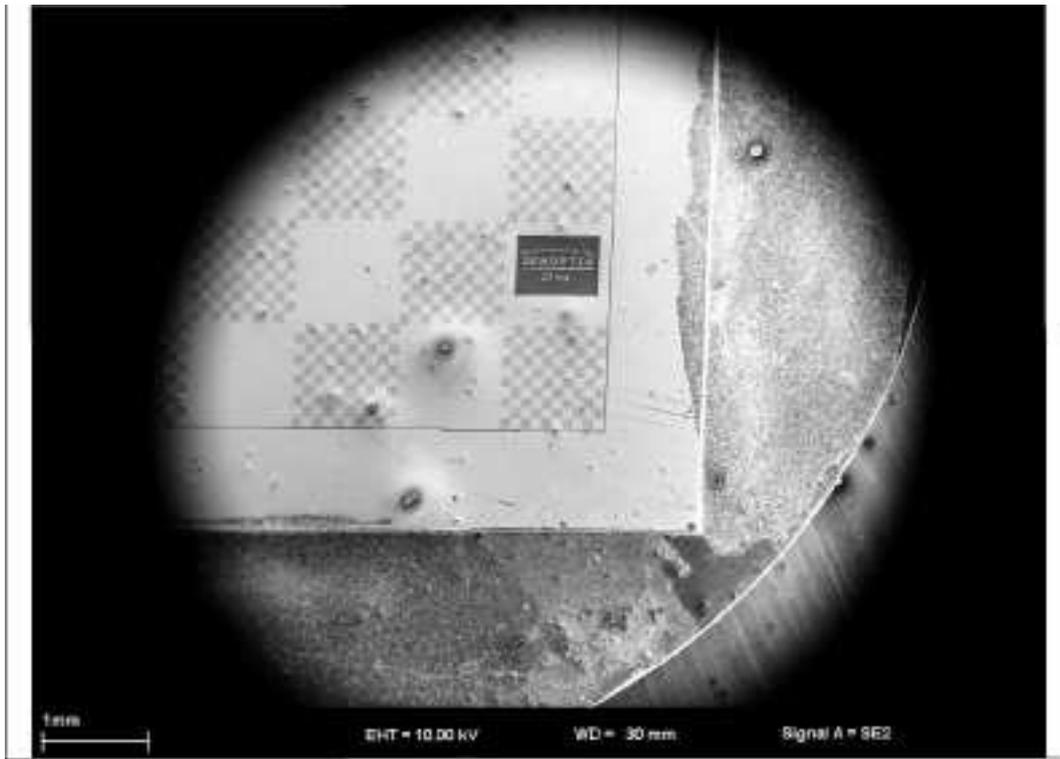


Рис. 25: увеличение для создания общего вида поверхности при рабочем расстоянии 30 мм

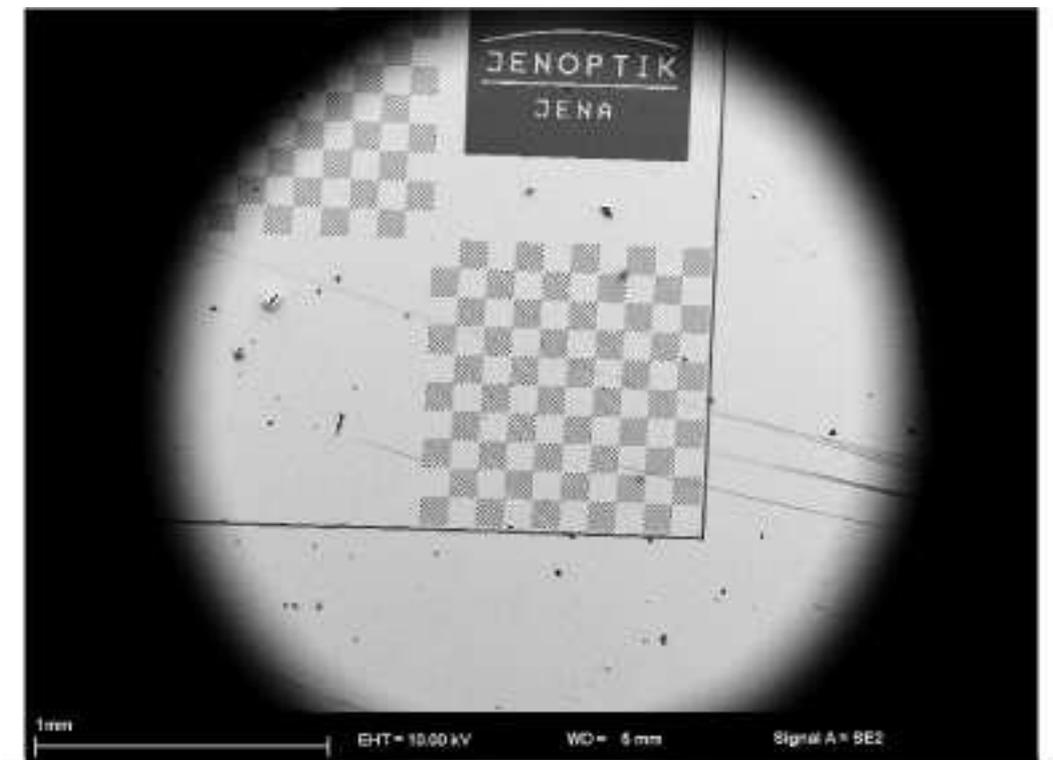


Рис. 26: увеличение для создания общего вида поверхности при рабочем расстоянии 5 мм

Сравнение контрастности материала на изображениях, полученных с помощью детектора SE2/RBSD от образца с полированной поверхностью

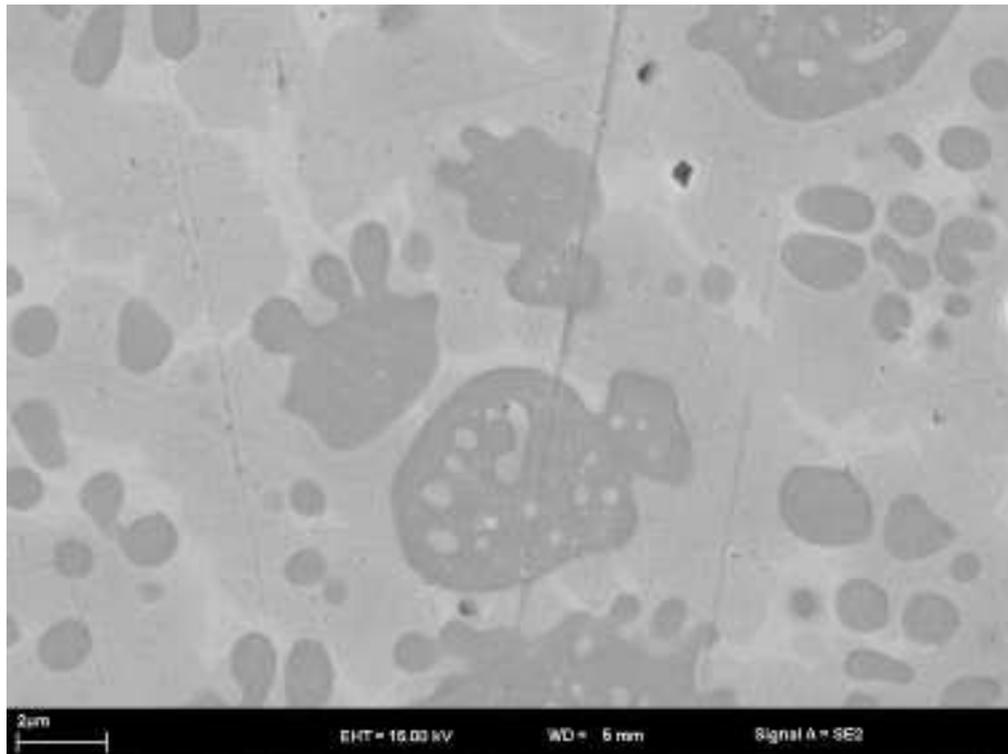


Рис. 27: на изображении SE контраст материала почти невидимый

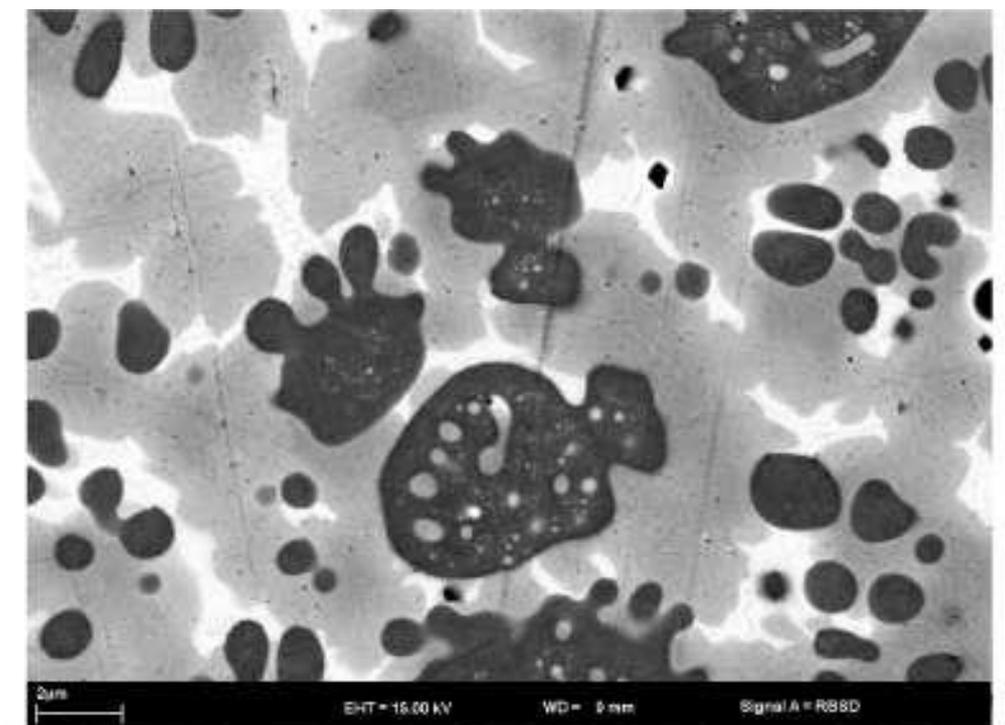


Рис. 28: Четкий контраста материала на изображении, полученном с помощью детектора BSE

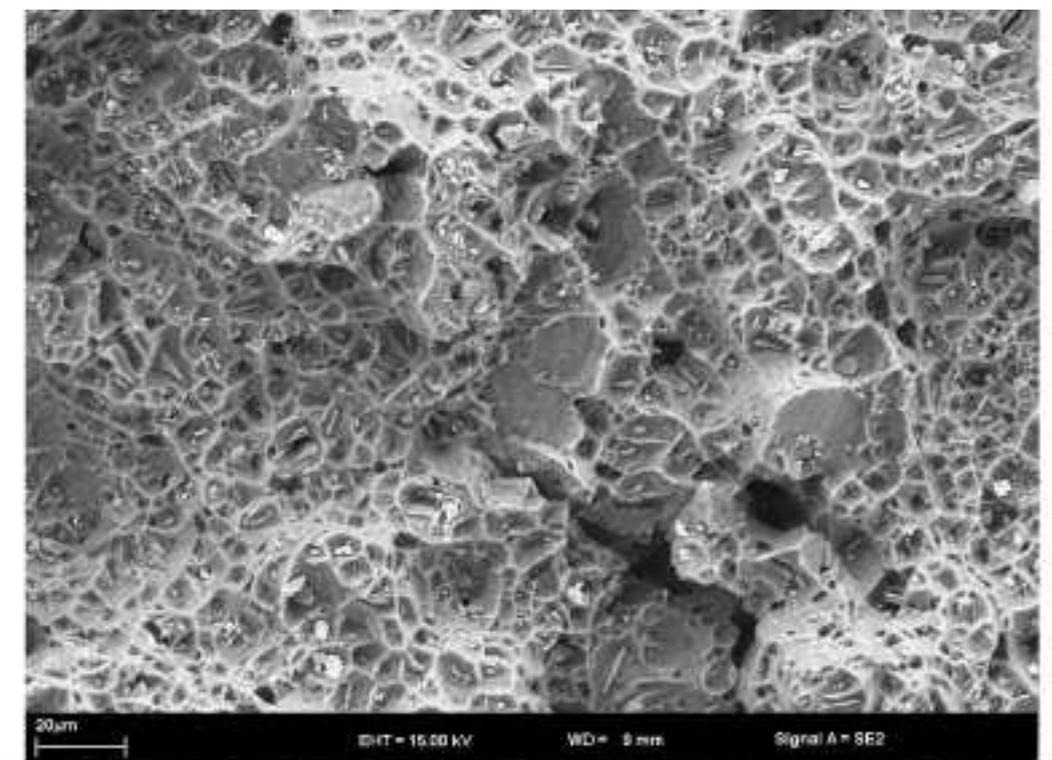


Рис. 29: хорошее трехмерное изображение, полученное с помощью детектора SE2

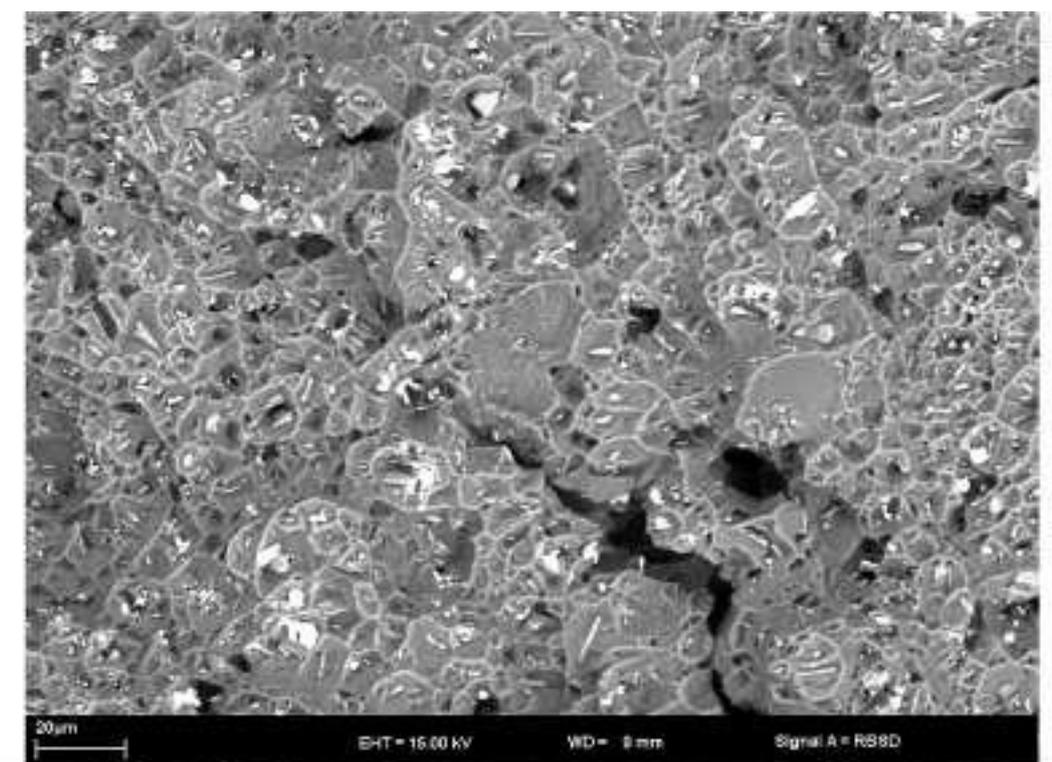


Рис. 30: доминирующий контраст материала

### 2.3.3 Детектор EsB

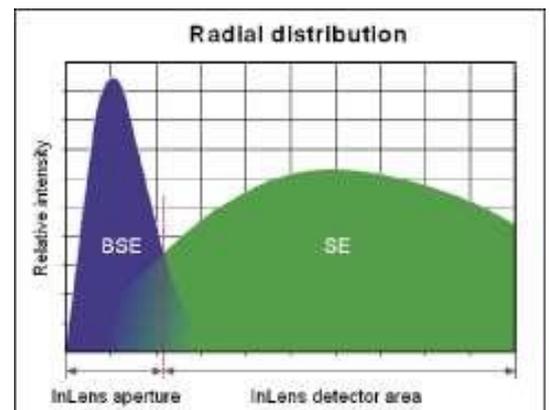
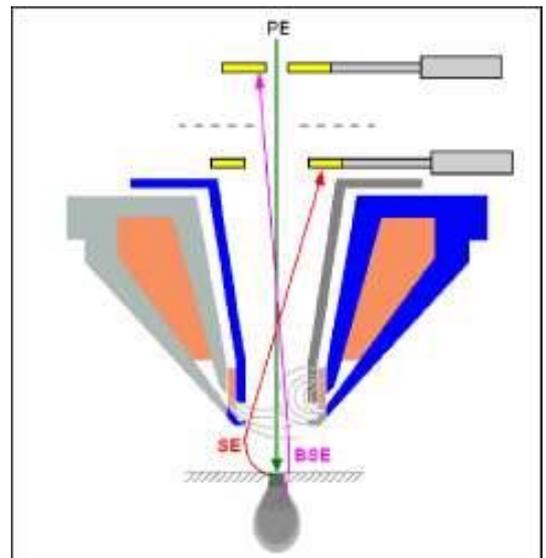
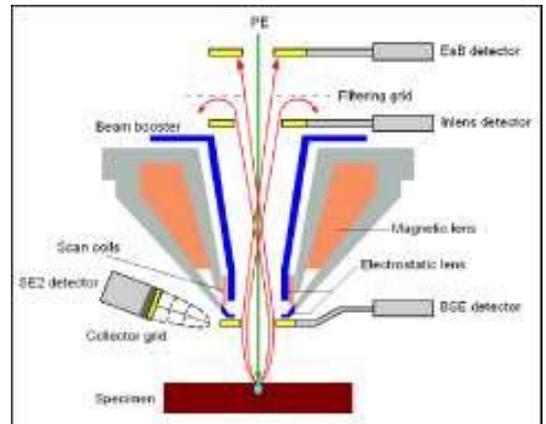
Аналогично детектору, встроенному в линзу, детектор BsE (с выбором энергии и угла для электронов BSE) детектирует непосредственно внутри траектории луча. Этот детектор является стандартным оборудованием для микроскопов серии ULTRA.

Часто требуется получить не только чистую информацию о поверхности, но также изображение контрастов материала. Обычно это осуществляется с помощью различных систем детекторов BSE (см. 2.3.4). Однако у этих детекторов есть несколько существенных недостатков, в основном они проявляются в работе при очень низких энергиях взаимодействия или в сочетании со встроенным в линзу детектором. Их конструкция предусматривает установку таких детекторов ниже последней линзы, влияющей на поле электростатической линзы и качество детектирования встроенного в линзу детектора, а также ограничивает наименьшее рабочее расстояние. Оба эффекта значительно снижают соотношение сигнал/шум и разрешение встроенного в линзу детектора. Кроме того, идеальное рабочее расстояние для детектирования BSE электронов с помощью таких детекторов составляет прибл. 9 мм, что связано с геометрическим расположением поверхности детектирования под последней линзой. Электроны BSE, регистрируемые этими детекторами, возникают в основном в диапазоне, относительно удаленном от центральной точки луча и покидают поверхность образца под тупым углом относительно луча первичных электронов. Более того, эффективность детекторов значительно уменьшается при использовании относительно низкого ускорения ( $< 3\text{кВ}$ ). Т.о., детектор EsB является альтернативой этим детекторам.

#### Преимущества детекторов EsB над детекторами BSE:

- контраст материала при низких напряжениях и в нанометрическом диапазоне
- не влияет поле электростатической линзы
- возможность работать при очень коротких рабочих расстояниях
- одновременное использование встроенного в линзу детектора и детектора EsB при оптимальных условиях
- возможность фильтровать энергию при низких энергиях взаимодействия

Вместе с электронами SE с низкой энергией, BSE электроны с высокой энергией испускаются из центра и пространства вокруг центра пучка. Электроны BSE покидают поверхность образца под очень острым углом (прибл. до  $15^\circ$ ) относительно луча первичных электронов. Т.к. угол выхода острый, эти электроны не обнаруживаются классическими детекторами BSE и даже встроенный в линзу детектор к ним практически не чувствительный.



Это значит, что, несмотря на очень высокую поверхностную чувствительность, встроенный в линзу детектор плохо реагирует на испущенные электроны BSE и поэтому демонстрирует очень слабую контрастность, характеризующую материал. Поэтому, детектор EsB устроен таким образом, чтобы детектирование BSE электронов проходило с высокой эффективностью. Конструкция детектора аналогична одному из встроенных в линзу детекторов, однако детектор расположен в другой плоскости относительно траектории луча. Электроны BSE и SE испущенные из центра луча поглощаются и ускоряются полем электростатической линзы. Электроны с низкой энергией сильно отклоняются полем электромагнитной линзы и фокусируются на встроенном в линзу детекторе. Напряженность магнитного поля и положение сцинтиллятора таковы, что 90% поглощенных электронов SE попадают во встроенный в линзу детектор. Этот факт демонстрируется на выше приведенном графике, показывающем статическое распределение электронов SE и BSE в плоскости встроенного в линзу детектора. На оси X показана активная поверхность сцинтиллятора и диафрагма встроенного в линзу детектора. На оси Y показана относительная интенсивность различных электронов. Большинство электронов SE попадает на сцинтиллятор, и т.о. вносит вклад в сигнал встроенного в линзу детектора. Однако, небольшая часть электронов SE попадает в область диафрагмы детектора. Эти электроны проходят через диафрагму детектора и достигают более удаленной электронной оптики.

На BSE электроны влияет также поле электромагнитной линзы. Т.к. их энергия высока, они отклоняются меньше, чем электроны SE. Большинство электронов BSE обнаруживается в области диафрагмы встроенного в линзу детектора. Поэтому, электроны с большей энергией проходят через диафрагму и не вносят вклад в информацию, получаемую от встроенного в линзу детектора. Сцинтиллятор детектора EsB находится в одной плоскости с электронной оптикой, что обеспечивает идеальные условия для детектирования электронов. Попадающие на детектор электроны создают на сцинтилляторе вспышки света, которые выводятся из траектории луча с помощью световода и передаются на подсоединенный фотоумножитель, где информация усиливается и выходит как сигнал, воспринимаемый электронной техникой.

Перед сцинтиллятором установлена фильтрующая сетка, позволяющая изменять напряжение в диапазоне от 0 до 1500В. Как и сетку коллектора в детекторе SE2, эту сетку можно использовать для создания электрического поля перед сцинтиллятором. Настройка потенциала производится в окне *Detectors SEM Control*, где выбирают параметр *ESB Grid*. Электроны SE, прошедшие через диафрагму встроенного в линзу детектора теперь могут быть обнаружены детектором EsB и постепенно исчезают. Более того, при низких напряжениях можно проводить фильтрацию энергии. Если энергия первичных электронов 1,2 кВ, а потенциал *Сетки ESB* 1 кВ, детектором EsB будут регистрироваться только электроны BSE, имеющие энергию в диапазоне 1-1,2кВ.

Подобно встроенному в линзу детектору, высокая эффективность детектора EsB сильно зависит от электрического поля электростатической линзы. Т.к. напряженность этого электростатического поля экспоненциально уменьшается с расстоянием, рабочее расстояние является одним из наиболее важных факторов, влияющих на соотношение сигнал/шум и соответственно на эффективность встроенного в линзу детектора. Вследствие малого значения величины пространственного угла, подходящего для детектирования, эффективность детекторов EsB гораздо сильнее зависит от рабочего расстояния, по сравнению с встроенным в линзу детектором. В зависимости от установленного ускоряющего напряжения, детектор всегда должен использоваться при рабочих расстояниях < 8мм. При более низких напряжениях 1-5 кВ рекомендуется использовать рабочее расстояние < 5 мм. При очень низких энергиях взаимодействия (100В – 1кВ) рабочее расстояние не должно превышать 4мм. Часто рекомендуют устанавливать прибл. 2 мм. При таком расстоянии первичные электроны с низкой энергией меньше подвержены, воздействию т.к. они получают гораздо более высокую энергию (от усилителя пучка) и должны пройти очень короткое расстояние длиной 1-2 мм для прохождения которого требуется значительно меньше энергии.

Ориентация поверхности образца может ограничивать сигнал. Сильный наклон поверхности изменяет угол выхода электронов так, что только немногие электроны выпускаются в направлении последней линзы и эффективность детектирования снижается. Поэтому важно избегать сильного наклона образца, если используется детектор EsB. Использование дополнительного детектора BSE, расположенного ниже последней линзы, также влияет на эффективность детектирования детектора EsB, т.к. он в значительной степени влияет на поле последней линзы. Т.о., детектор BSE должен быть смещен в положение ожидания. Аналогично встроенному в линзу детектору, детектор EsB не подходит для исследований при малых увеличениях. С другой стороны, значение наименьшего возможного увеличения ограничивается выбором относительно маленького рабочего го расстояния. С другой стороны, в центре поля изображения может



возникнуть яркое пятно. В этом случае, диафрагма встроенного в линзу детектора ухудшает изображение. Чтобы избежать этого, для получения изображения общего вида всегда используют детектор Se2, например, при сканировании образца или при работе на очень больших рабочих расстояниях.

В принципе, детектор EsB можно использовать при ускоряющих напряжениях величиной до 20 кВ. Ниже этого предела поле электростатической линзы (усилитель пучка) отключается, что недопустимо сильно снижает эффективность встроенного в линзу детектора и детектора EsB. Хотя этот детектор обеспечивает хорошие результаты даже при высоких напряжениях взаимодействия, в основном он используется для создания контрастности материала в среднем и низком диапазонах напряжений.

Чем ниже энергия возбуждения, тем меньше глубина проникновения электронов и в связи с этим меньше зона возбуждения, в которой формируются электроны BSE. Разрешение по плоскости изображений, полученных электронами обратного рассеяния, также улучшается, т.к. контрастность формируется только электронами, образующимися в области вокруг центра луча. Этот эффект показан на рис. 37 и 38: изображение слоя получено при ускоряющем напряжении 1,5 кВ, наночастицы осаждались на поверхности. Рис. 37 представляет информацию, полученную от встроенного в линзу детектора. Четко видны структура и особенности поверхности слоя, а также более мелкие частицы. Однако при этом невозможно различить являются ли эти частицы частью топографии поверхности или они являются другим материалом. Изображение, полученное детектором EsB (см. рис. 38) дает точную информацию. Очень хорошо показано распределение наночастиц размером 10-40 нм благодаря контрастам, создаваемым детектором EsB. Т.к. обнаруженные электроны BSE возникают в более глубоком слое поверхности образца, хорошо показаны даже такие наночастицы, которые скрыты под тонкими структурами и, т.о., могут быть с трудом обнаружены или не обнаружены вообще на изображениях, полученных с помощью встроенного в линзу детектора. Очень низкие энергии возбуждения также используют для компенсации или уменьшения зарядов на непроводящих или плохо проводящих образцах. Если электроны пронизывают непроводящий или плохо проводящий образец, они собираются на поверхности вследствие плохой проводимости. При этом образуются локализованные пространственные заряды, влияющие на электронный луч и способные значительно ухудшить качество изображения. Однако этот эффект можно компенсировать или минимизировать снижая первичную энергию электронов и зондовый ток (*размер апертуры*). На рис. 31 и 32 показан коррозионный слой, на котором зарядное равновесие достижимо только при 800 В. при этом изображение, полученное с помощью встроенного в линзу детектора, четко представляет поверхностную структуру оксидного слоя. Различимы даже игловидные кристаллиты на поверхности. Однако, только изображение, полученное с помощью детектора EsB (рис. 32) показывает, что эти кристаллиты являются продуктами осаждения или трансформации и имеют более высокое атомное число, чем остальной оксидный слой. Чтобы получить возможность проводить сравнение. изображение от детектора EsB было получено при том же ускоряющем напряжении, что и изображение от встроенного в линзу детектора. Однако можно получать изображение при более высоких энергиях (1 – 1,5 кВ). Электроны BSE имеют гораздо более высокую энергию, чем электроны SE и образуются в более глубоком слое поверхности образца, хотя в большинстве случаев заряды располагаются непосредственно на поверхности. Поэтому, по сравнению с изображениями, полученными встроенным в линзу детектором только от SE электронов, ухудшение качества BSE изображений часто становится очевидным только при высоких энергиях. Рис. 33 – 36 показывают два образца, характеризующихся четко выраженной топографией. Изображения, полученные с помощью встроенного в линзу детектора (рис. 33 - 35), демонстрируют четко выраженный краевой эффект вследствие увеличенного потока SE на сильно наклоненных поверхностях. Т.к. поле электростатической линзы сильно притягивает электроны SE с низкой энергией, поглощение электронов происходит в очень большом пространственном угле. Т.о., в формировании сигнала учувствуют электроны, испущенные под очень острым углом и плоско относительно поверхности. Это приводит к увеличению сигнала от наклоненных поверхностей. В то время как краевой эффект не заметен для изображений полученных с помощью детектора EsB (рис. 34 и 36), контрастность материала проиллюстрирована очень хорошо. Это связано с принципами детектирования детектора EsB. В формировании сигнала учувствуют электроны BSE, покинувшие образец под очень острым углом относительно луча первичных электронов. Электроны, испущенные под более тупыми углами, не будут поглощаться полем электростатической линзы или будут фокусироваться в плоскости электронной оптики, которая находится вне зоны детектирования встроенного в линзу и EsB детекторов. Т.к. электроны BSE образуются на большей глубине, мелкие особенности поверхностной структуры, видимые на изображении от встроенного в линзу детектора, становятся незаметными на изображениях, полученных с помощью детектора EsB. Рис. 39-42 демонстрируют, информация, передаваемая изображением, зависит установленного потенциала фильтра (*ESB Grid*) при ускоряющем напряжении 1,27 кВ. изображение, полученное с помощью встроенного в линзу детектора (рис. 39) демонстрирует четко выраженный краевой эффект, тогда как поверхностные структуры изображены четко. То же место, рассмотренное с помощью детектора BSE при потенциале 0 В (рис. 40), демонстрирует минимальный краевой эффект, но контрастность материала незначительна. Изображение не дает другой информации кроме той, которая получена с помощью встроенного в линзу

детектора. Это связано с количеством электронов SE, проходящих через диафрагму встроенного в линзу детектора, и, т.о., фиксирующихся детектором EsB. Увеличение потенциала фильтра на 100В (рис. 41) сокращает информацию о топографии, однако увеличивается контрастность материала. Однако типичная контрастность материала достигается только при потенциале фильтра 1177 В (рис. 42). При этих условиях детектируются именно те электроны, которые покидают образец под соответствующим углом и имеющие соответствующую энергию, позволяющую создать изображение контрастности материала с подавлением всех других механизмов контрастности. Часто рекомендуют подбирать параметр *ESB Grid* так, чтобы изображение содержало необходимую информацию, особенно в исследованиях при низких напряжениях. На рис. 43 и 44 показан пример возможного применения, когда изображение от встроенного в линзу детектора уже содержит информацию от детектора EsB. В этом случае разница между атомными числами двух фаз настолько велика, что значительное различие контрастности заметно даже когда используется встроенный в линзу детектор (рис. 43). Однако контрастность SE также содержит топографическую и поверхностно-характеристическую информацию, которая частично покрывает или полностью перекрывает чистую контрастности материала. Более однородная иллюстрация распределения двух фаз показана на изображении, полученном от детектора EsB (рис. 44), т.к. здесь сильно минимизированы топографические эффекты. Если требуется дальнейшая оценка изображения, например, при фазовом анализе, рекомендуется использовать изображения от детектора EsB, т.к. они обеспечивают четкий контраст, не перекрываемый другими эффектами.

Между детектором EsB и встроенным в линзу детектором существуют три следующие различия:

Особенности детектора EsB, отсутствующие у встроенного в линзу детектора

- менее чувствителен к зарядам
- подавление краевого эффекта и топографических эффектов
- создание контрастности материала в нанометрическом диапазоне также при очень низких возбуждающих напряжениях

В ниже приведенной таблице указаны некоторые рекомендуемые значения и комментарии по работе детектора EsB. Факты, перечисленные выше, проиллюстрированы на примерах.

Параметр	Рекомендуемые условия/ комментарии
<b>Ускоряющее напряжение</b> 100В – 20 кВ  100В – 3 кВ  3 кВ – 10кВ  10 кВ – 20 кВ	В принципе, применение возможно до напряжения 20 кВ. Если напряжение менее 20кВ, усилитель пучка отключается. Низкие напряжения используют для компенсации заряда и для увеличения разрешения по плоскости контрастности материала. Средний диапазон напряжений подходит для многих применений. Диапазон напряжений часто используют для аналитических исследований.
<b>Рабочее расстояние</b> < 8 мм  2 – 4 мм 4 – 8 мм	Рабочее расстояние должно быть как можно короче, т.к. оно зависит электростатического поля линзы объектива. Для работы при низком напряжении (100 В – 3 кВ) Для диапазонов среднего и высокого напряжения (3-20 кВ)
<b>Потенциал фильтра (<i>EsB Grid</i>):</b> 0 – 1500 В	В частности, в работе при низких напряжениях, достижимая контрастность материала может быть оптимизирована фильтрацией энергии
<b>Апертура:</b> 30 мкм  7,5 – 20 мкм  60 и 120 мкм	Для многих применений рекомендуется стандартная апертура. Существуют ограничения зондового тока для компенсации зарядов или анализа чувствительных к лучу образцов. Часто рекомендуется только для решения аналитических задач
<b>Наклон образца:</b>	Следует избегать сильного наклона образцов
<b>Рабочий режим:</b>	Приемлем только при высоком вакууме, т.к. усилитель пучка отключается в режиме VP. Детекторы BSE, установленные ниже линзы объектива, влияют на поле электростатической линзы!!!

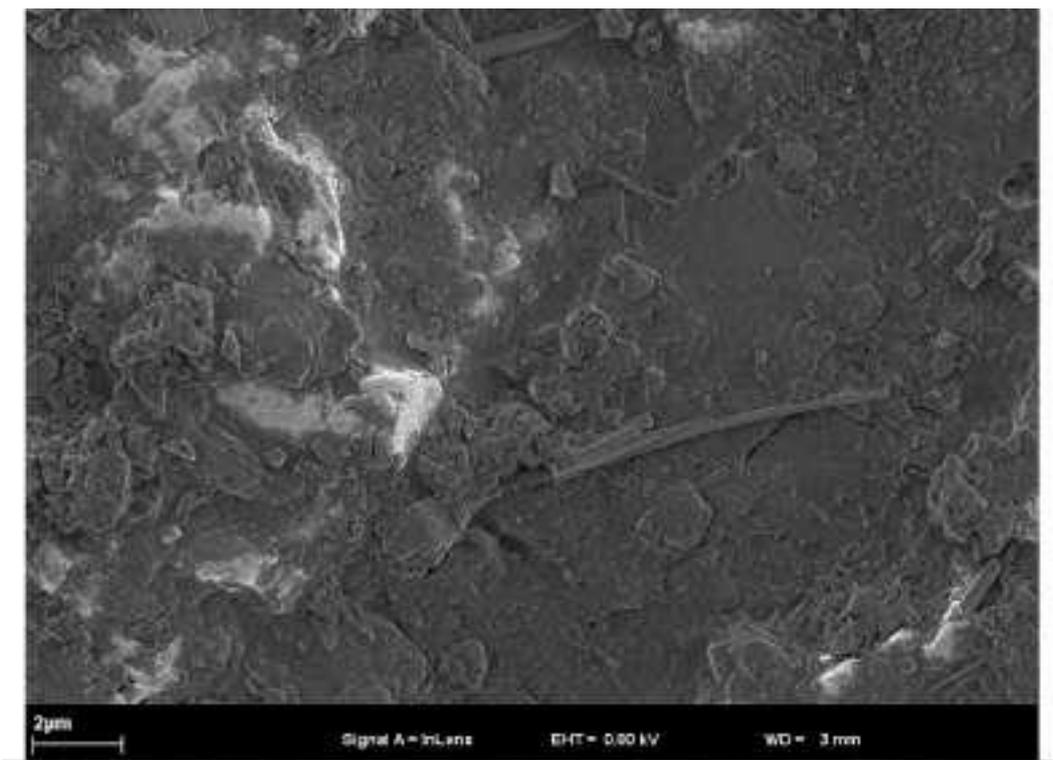


Рис. 31: хорошая информация о поверхности

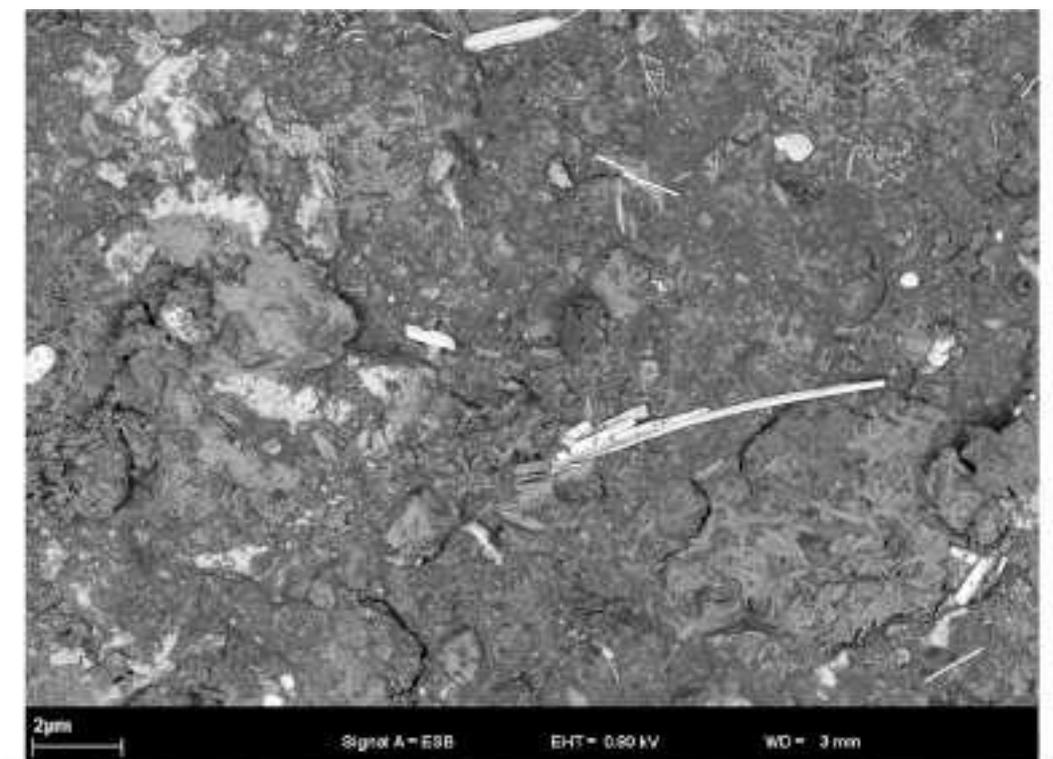


Рис. 32: значительная контрастность материала (ESB Grid 415B)

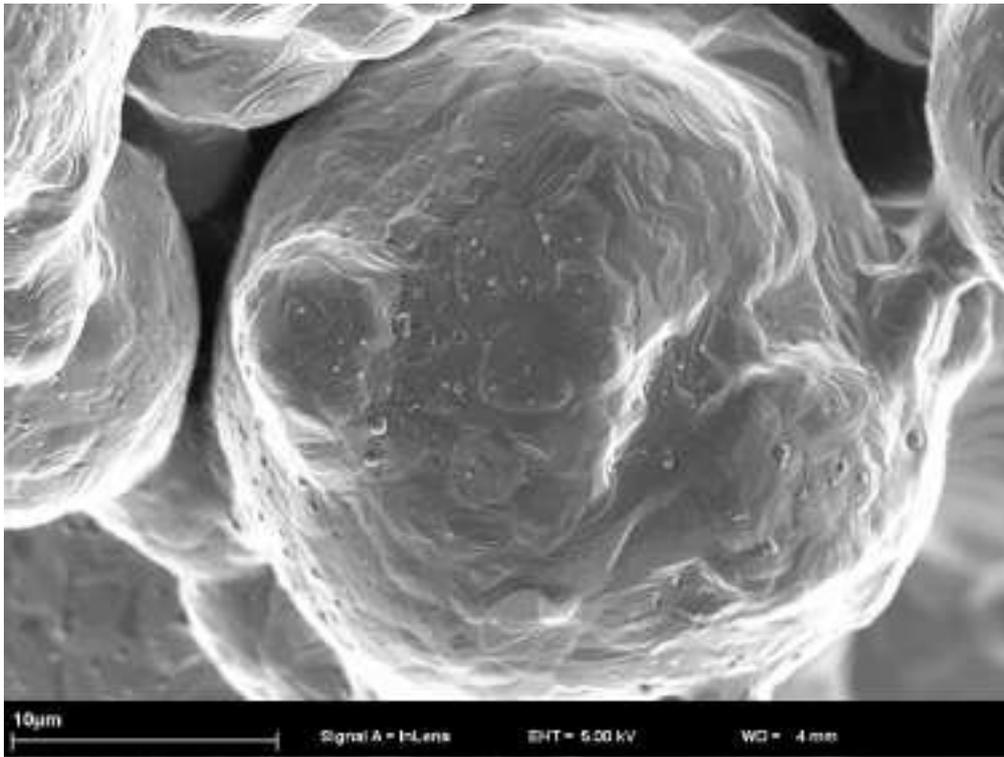


Рис. 33: хорошая информация о поверхности, но сильный краевой эффект

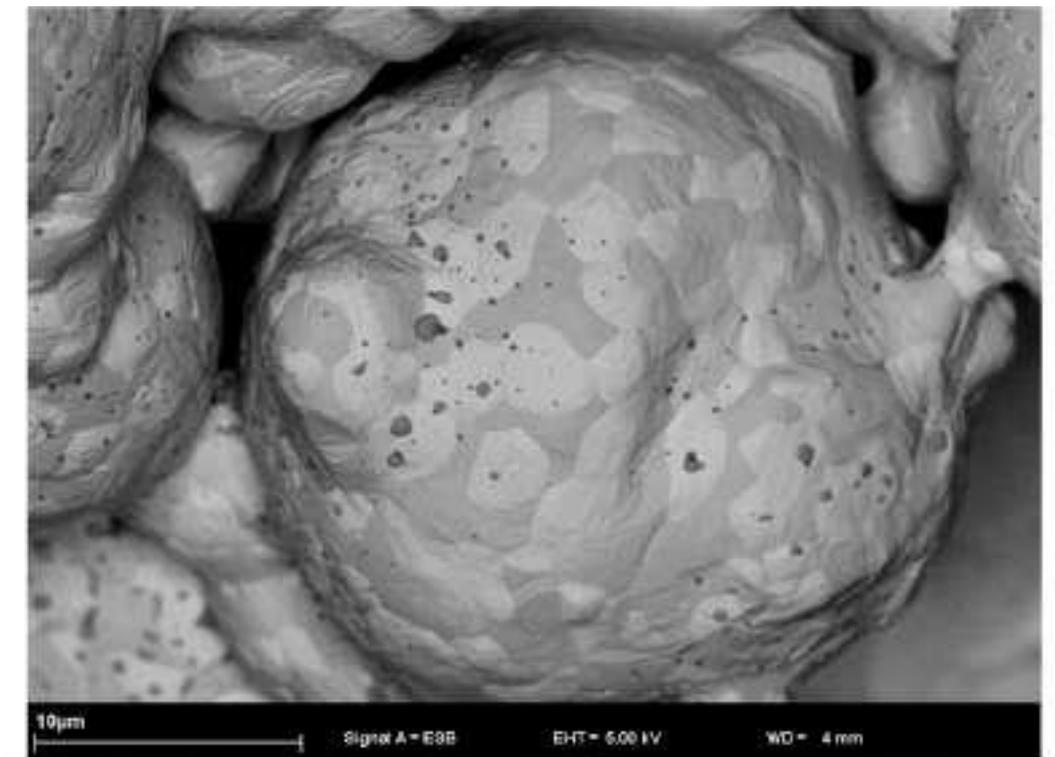


Рис. 34: значительная контрастность материала и минимизация краевого эффекта (ESB Grid 500B)

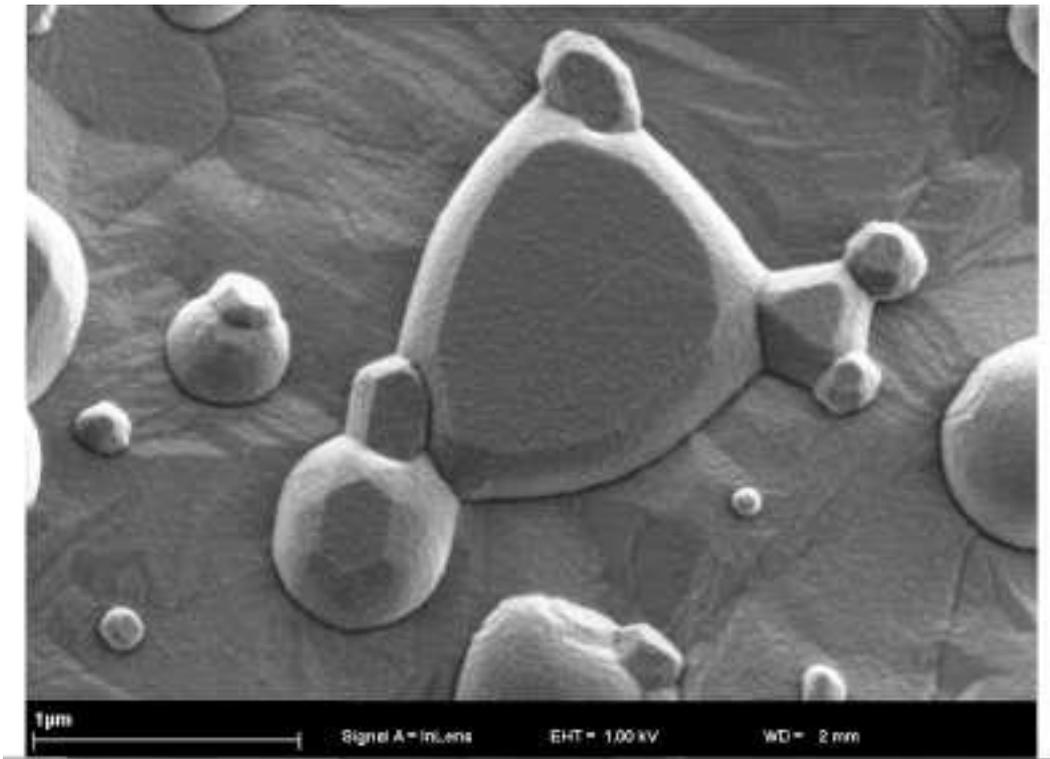


Рис. 35: хорошая информация о поверхности, но сильный краевой эффект

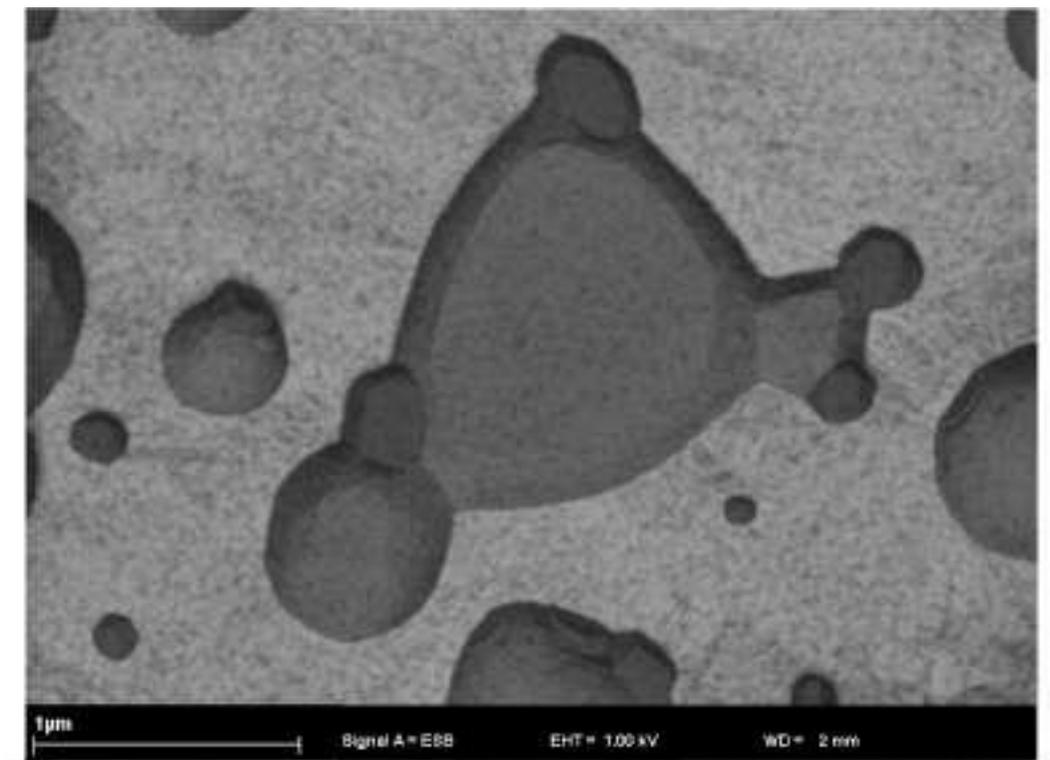


Рис. 36: значительная контрастность материала и минимизация краевого эффекта (ESB Grid 900B)

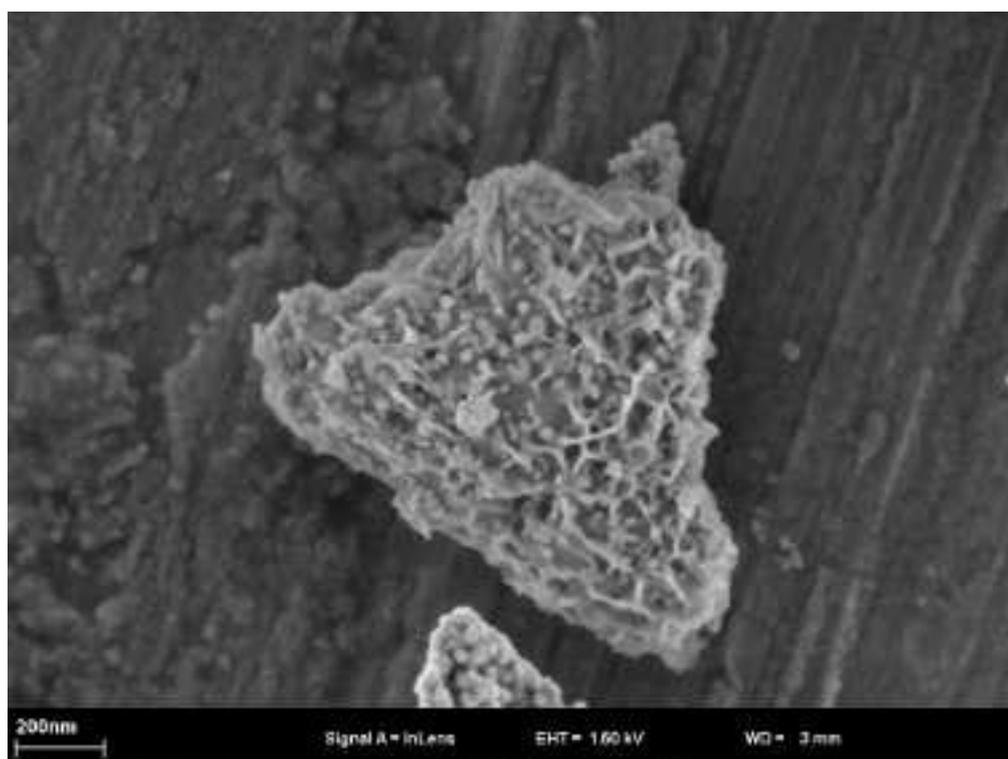


Рис. 37: некоторые наночастицы перекрываются поверхностью

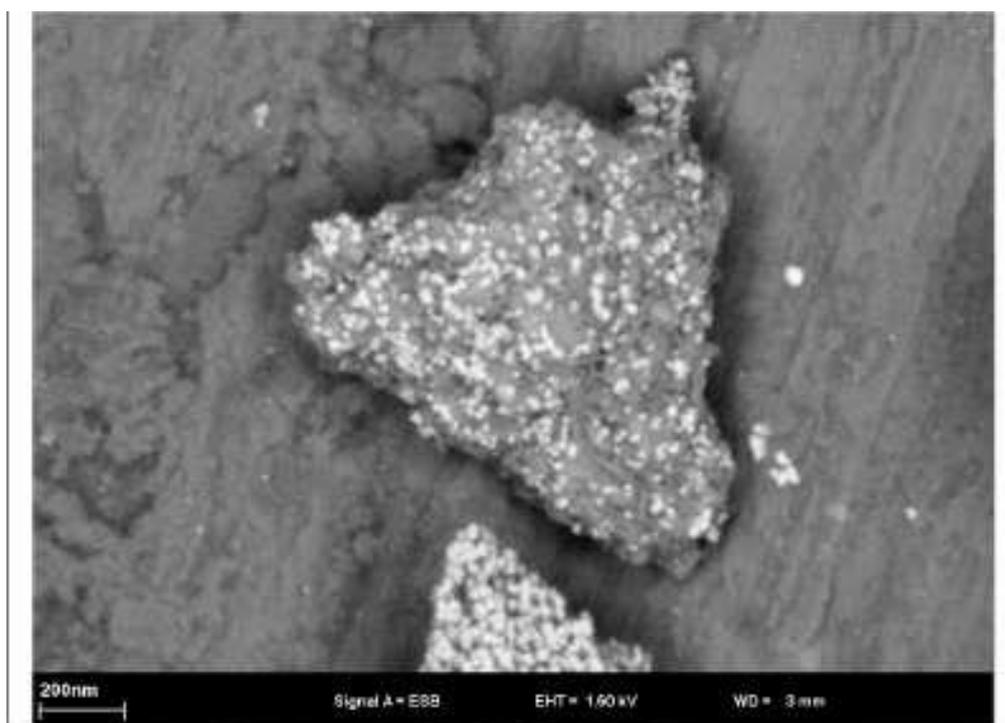


Рис. 38: наночастицы четко видны благодаря контрастности материала (ESB Grid 650B)

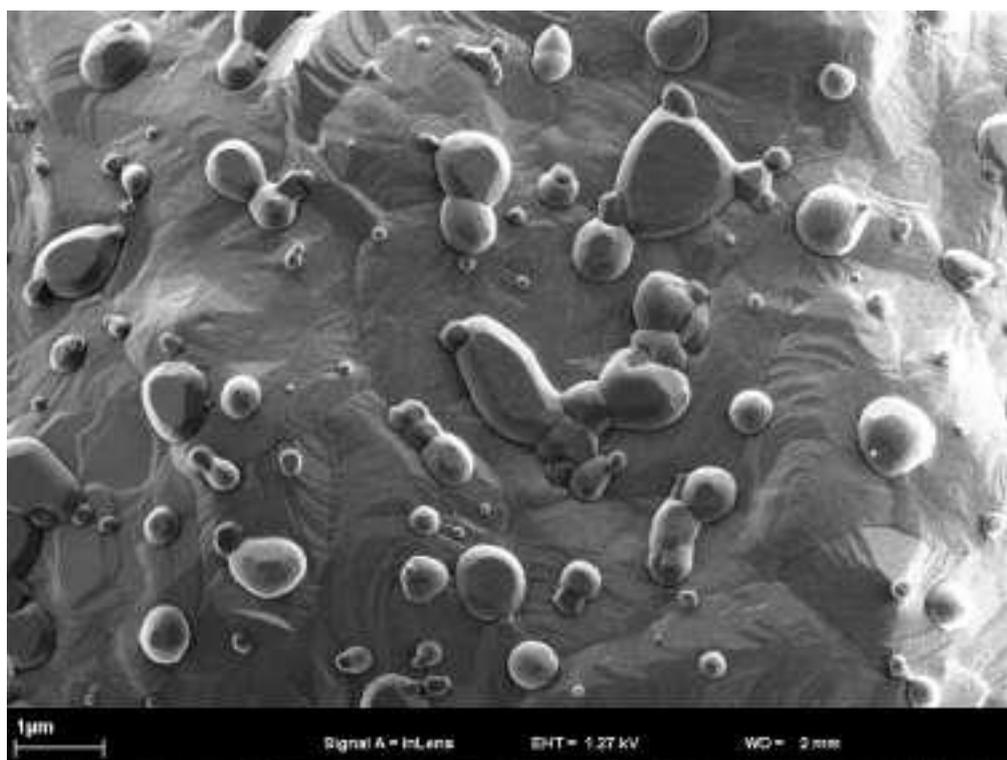


Рис. 39: хорошая информация о поверхности, но сильный краевой эффект

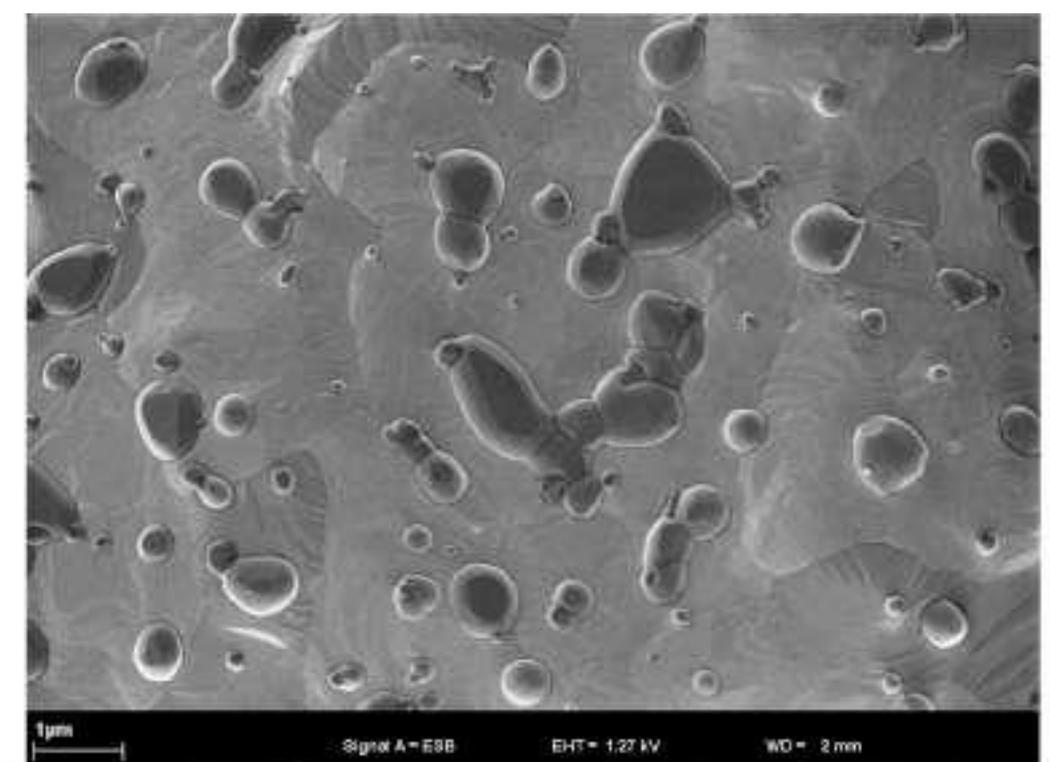


Рис. 40: минимизация краевого эффекта с превалирующей топографической контрастностью (ESB Grid 0B)

Сравнение контрастности материала на изображениях полученных от встроенного в линзу и EsB детекторов при различных потенциалах фильтра

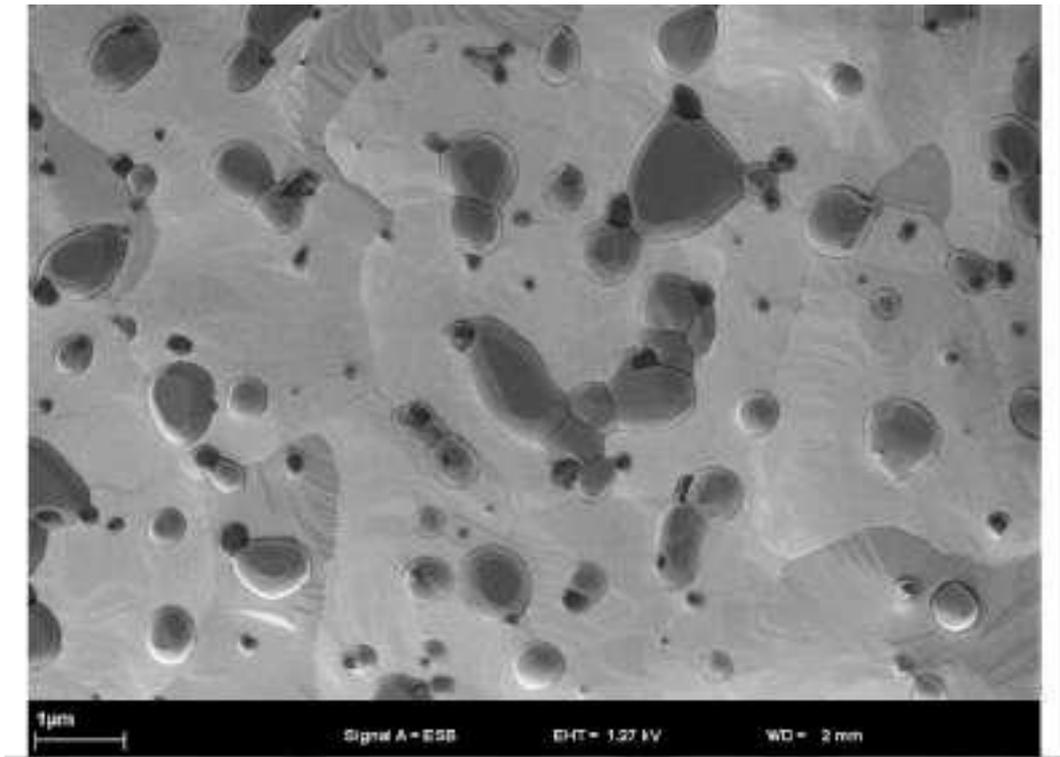


Рис. 41: дополнительная минимизация краевого эффекта, исходные материал характеризующие контрастности (ESB Grid 100 В)

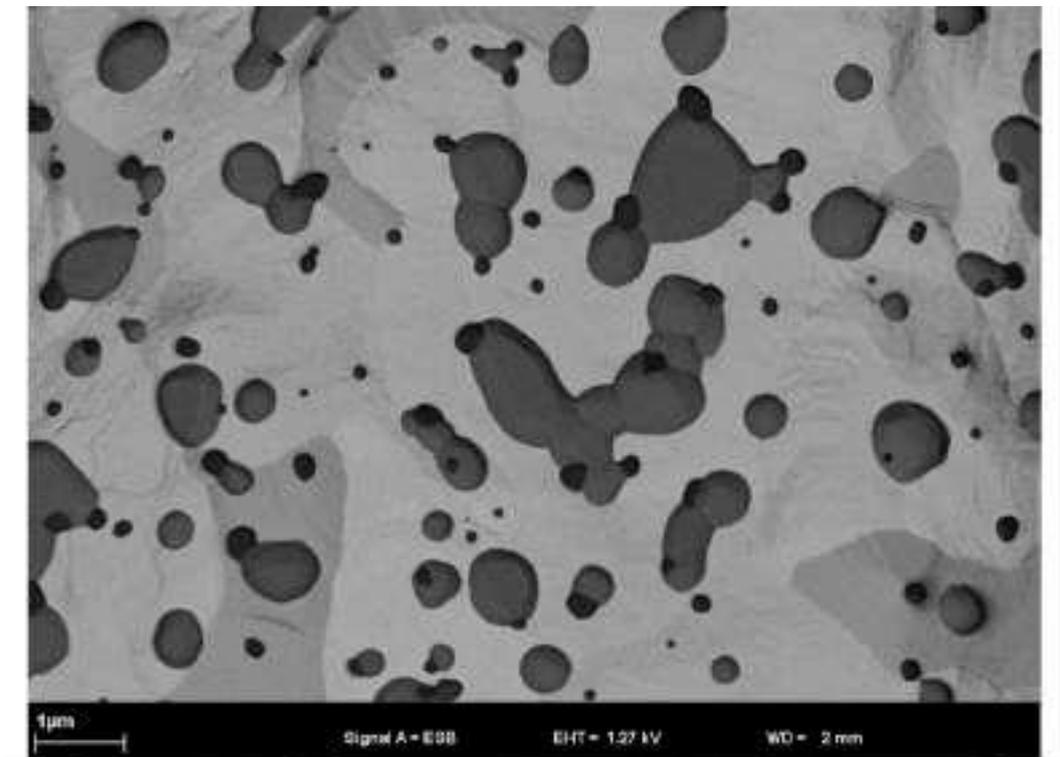


Рис. 42: значительная контрастность материала (ESB Grid 1177 В)

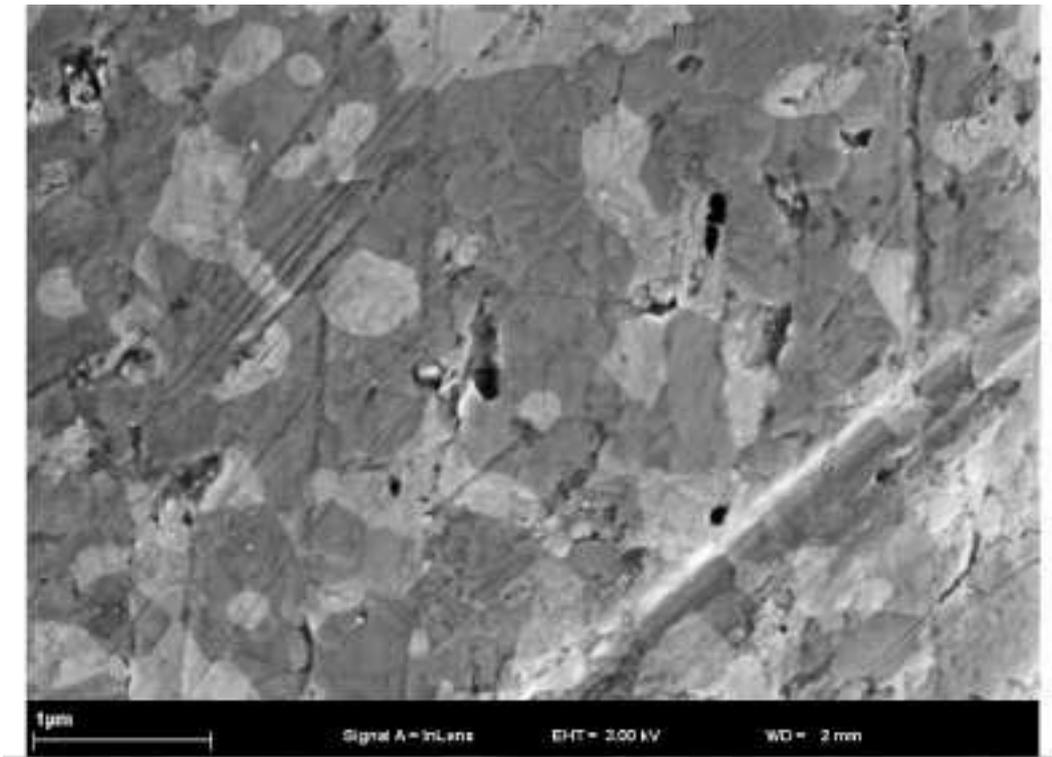


Рис. 43: четкая контрастность материала и топографическая контрастность

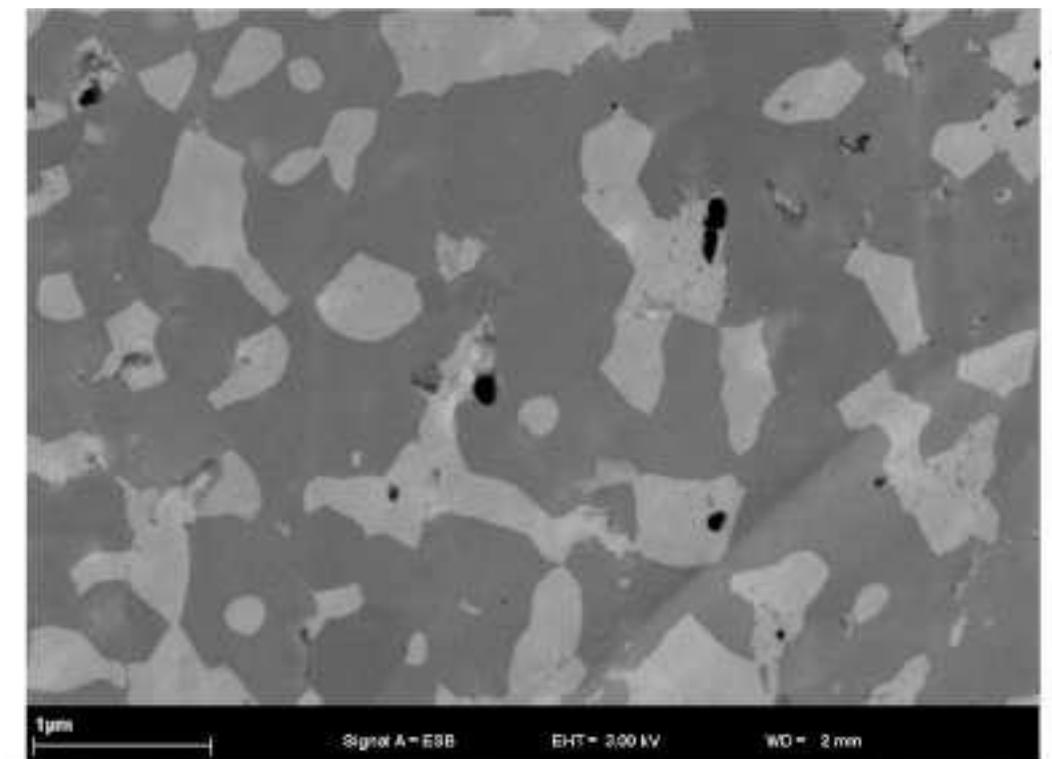
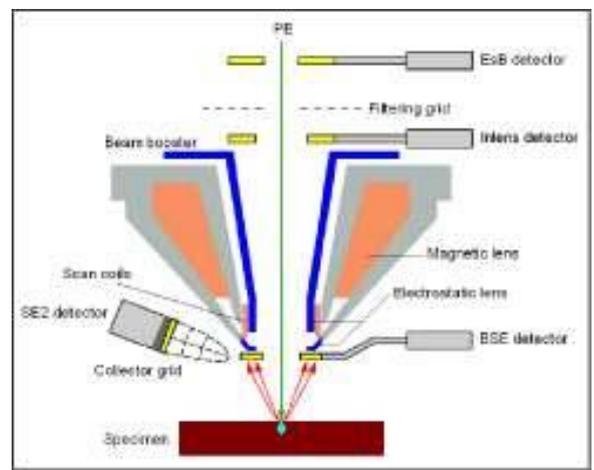


Рис. 44: Доминирующая контрастность материала, минимализация топографической контрастности

### 2.3.4 Детектор электронов обратного рассеяния

Дополнительный источник сигнала, часто используемый сканирующей электронной микроскопии это детектор электронов обратного рассеяния (детектор BSE), который позволяет очень эффективно демонстрировать различия материала образцов. Главным образом это связано с положением детектора BSE. В отличие от детектора SE, рассматривающего образец сбоку, детектор BSE установлен под последней линзой и поэтому рассматривает поверхность сверху. Такое положение обеспечивает очень большой пространственный угол, который можно использовать для детектирования электронов BSE.



Хотя детектор BSE можно использовать для создания изображений различных видов контрастности (напр., контраст ориентации кристаллов, магнитный контраст типа II и т.д.), его основное назначение – показать контрастность материала. Этот контраст зависит от коэффициента обратного рассеяния, который увеличивается с увеличением атомного числа.

Чем выше коэффициент обратного рассеяния, тем больше электронов BSE, доступных для детектирования, генерируется первичным электронным лучом. Если в образце присутствуют различные фазы, те, которые имеют более высокое среднее атомное число на изображении выглядят ярче, чем те у которых атомное число меньше.

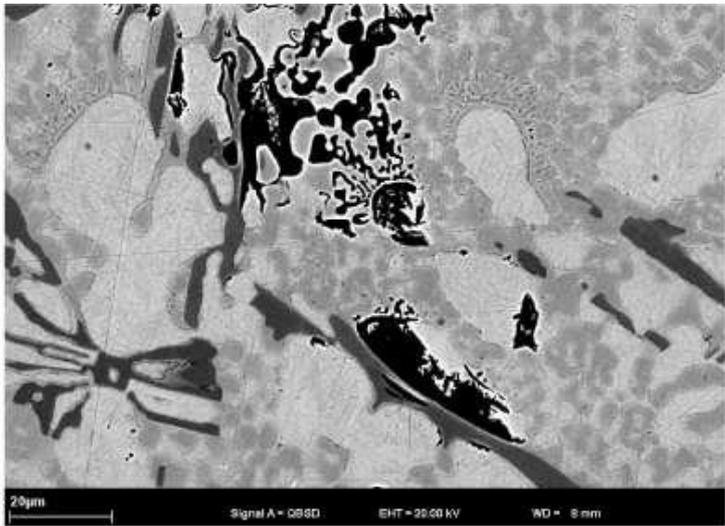
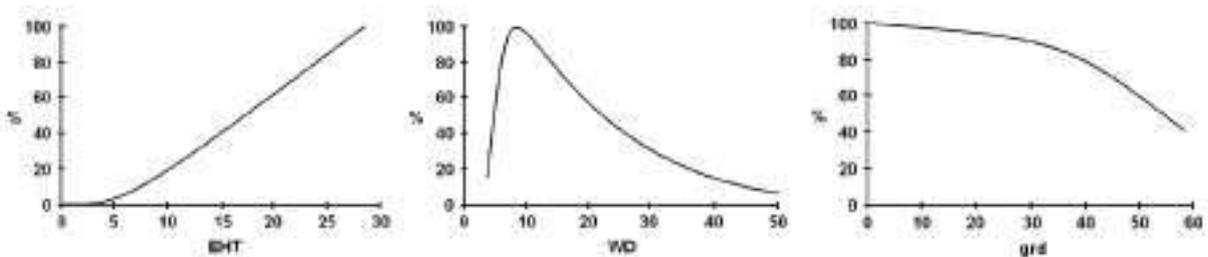


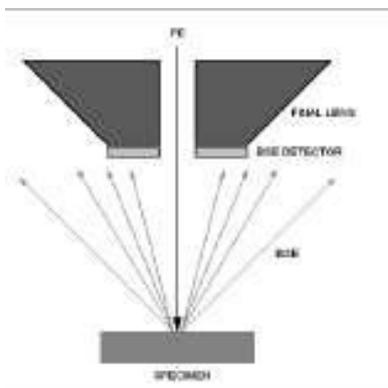
Рис. 45: изображение контрастности материала с помощью детектора BSE

В большинстве случаев детекторы BSE используются в сочетании с сцинтиллятором/ фотоумножителем (напр., детектор Robinson или Centaurus) или используются полупроводниковые детекторы (напр., 2QBSD, 4QBSD). Эффективность детектора определяется в основном величиной ускоряющего напряжения, выбранным рабочим расстоянием и ориентацией образца относительно детектора (графики см. ниже).

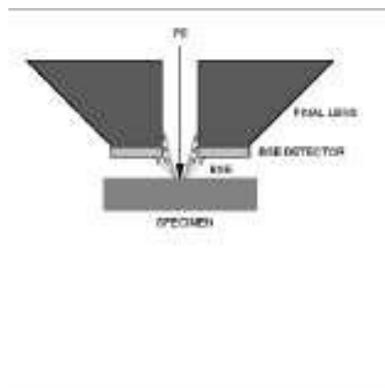


Т.к. детекторы BSE работают в основном без включения напряжения сцинтиллятора (повторное ускорение электронов, т.е. повышение эффективности детектирования) и используют только энергию генерируемых электронов обратного рассеяния, т.о. эффективность детектора возрастает с увеличением ускоряющего напряжения. В зависимости от материала образца, при работе с детектором BSE ускоряющее напряжение должно быть установлено на значение припл. 3кВ.

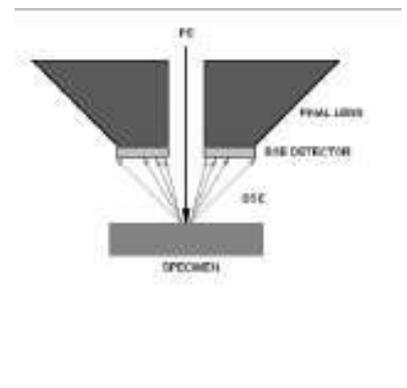
Другим важным параметром является рабочее расстояние. Т.к. детекторы BSE расположены непосредственно под последней линзой, в центре детектора высверливается отверстие, через которое электронный луч сканирует образец. Активный слой (сцинтиллятор, полупроводниковые диоды) расположен вокруг этого отверстия. Если выбранное рабочее расстояние слишком короткое, только небольшое количество электронов обратного рассеяния будет ударяться в детектор. Большинство электронов проходит сквозь просверленное отверстие, не оказывая влияния на сигнал. Если рабочее расстояние слишком большое, множество электронов не попадает на детектор, что также снижает эффективность. Пространственный угол, оптимальный для детектирования электронов обратного рассеяния, используется только в относительно небольшом диапазоне рабочих расстояний. Когда используется детектор BSE, рабочее расстояние устанавливается величиной припл. 9 мм.



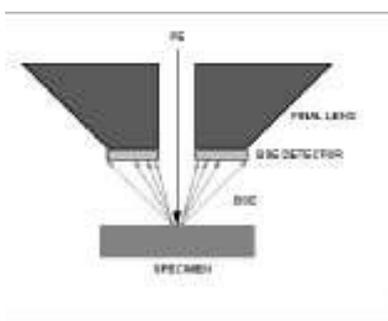
Слишком большое рабочее расстояние



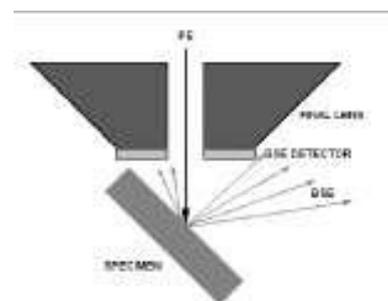
Слишком маленькое рабочее расстояние



Оптимальное рабочее расстояние



Образец без наклона



Образец наклонен

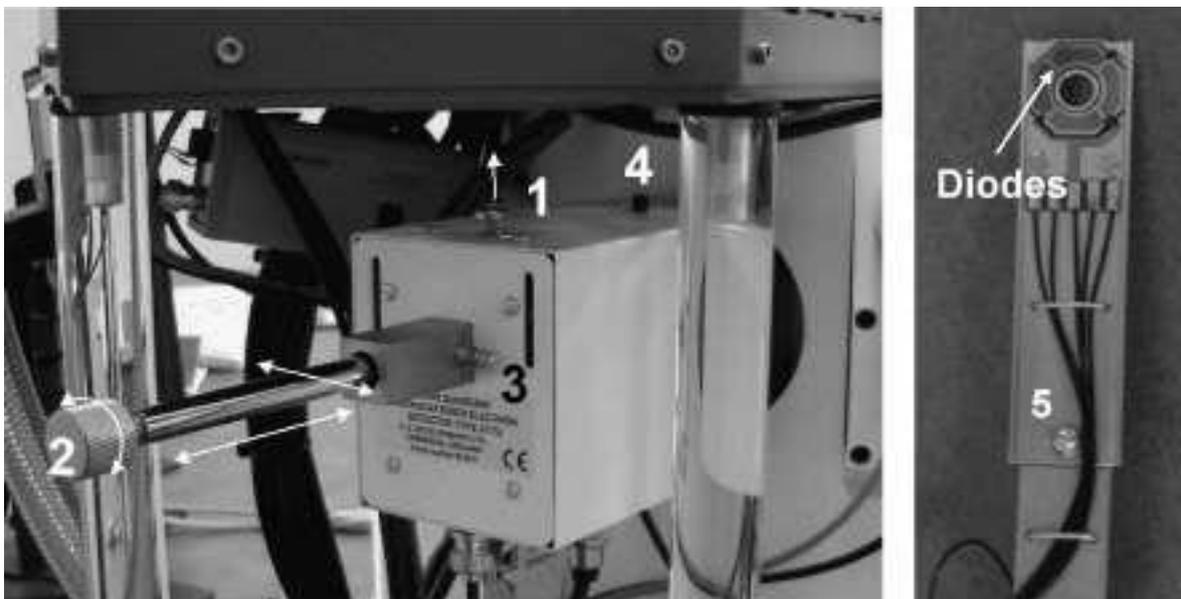
Вследствие угла обзора детектора BSE (детектор расположен непосредственно сверху), ориентация образца относительно детектора является решающим фактором для эффективности детектирования. Если для детектора SE рекомендуется сильный наклон образца в сторону детектора, т.к. это позволяет увеличить количество детектируемых электронов SE и BSE, то для детектора BSE наклон образца является помехой для детектирования. Также наклон образца способствует распространению образующихся электронов обратного рассеяния в различных направлениях. Чем больше наклонен образец, тем больше электронов будет рассеиваться в направлении вперед (рассеяние в прямом направлении) и тем меньше электронов будет регистрировать детектор BSE. Поэтому для детектора BSE рекомендуют использовать малые углы наклона.

Таблица ниже содержит некоторые рекомендуемые значения и советы касательно использования детектора BSE.

Параметр	Рекомендуемые условия/ комментарии
<b>Ускоряющее напряжение:</b> 1 кВ – 30 кВ	Использование возможно, но достаточная контрастность достигается в основном при 3 кВ – 5кВ
<b>Рабочее расстояние:</b> 7 – 12 мм	Если рабочее расстояние слишком мало или слишком велико, оптимальный пространственный угол не достигается
<b>Апертура:</b> 30 мкм 7,5 – 20 мкм  60 мкм 120 мкм	Для многих областей применения достаточной является стандартная апертура. При такой апертуре зондовый ток часто оказывается слишком слабым, чтобы получить достаточное соотношение сигнал/шум и необходимую контрастность, более сильные зондовые токи часто улучшают контрастность. Часто рекомендуется для решения аналитических задач
<b>Наклон образца:</b>	Следует избегать сильного наклона
<b>Рабочий режим:</b>	Использование возможно при высоком вакууме и при режиме VP

### 2.3.5 Детектор 4QBSD

Обычно, до тех пор, пока 4-х квадрантный детектор электронов обратного рассеяния (4QBSD) не используется, он находится в положении ожидания. Штанга детектора (2) с 4 сегментами полупроводниковых диодов отведена так, чтобы увести диоды, находящиеся под последней линзой. Чтобы использовать 4QBSD 4 сегмента полупроводниковых диодов располагают под полюсным наконечником для чего сначала нужно потянуть вверх фиксатор, а затем ввести штангу детектора. Убедитесь, что между последней линзой и держателем образца или образцом для этого достаточно места!



Детектор 4QBSD – это полупроводниковый детектор, работающий на 4 кремневых диодах. Все 4 диода соединены в обратном смещении. Электроны обратного рассеяния, имеющие высокую энергию, ударяясь о различные сегменты, образуют в них электронно-дырочные пары. Вследствие разделения зарядов можно измерить ток каждого сегмента и использовать сигнал для создания изображения. Т.к. тонкий проводящий слой на диодах испаряется и, прежде всего, пропускается электронами обратного рассеяния, детектор будет реагировать только на определенный энергетический порог. В зависимости от образцов, в большинстве случаев эффективная работа возможна при ускоряющем напряжении от 3 кВ. Вследствие узкой полосы пропускания полупроводниковых детекторов и высокой емкости кремневых полупроводников (большой период разрядки), детектор 4QBSD является TV-совместимым лишь в ограниченных пределах. Поэтому, рекомендуют использовать пониженную скорость сканирования. В большинстве случаев рекомендуют настраивать электронно-оптические параметры (фокус, маркирующее устройство и т.д.) с помощью детектора SE, а затем переключиться на детектор 4QBSD для того, чтобы передать изображение в видеопамять, используя подавление шумов.

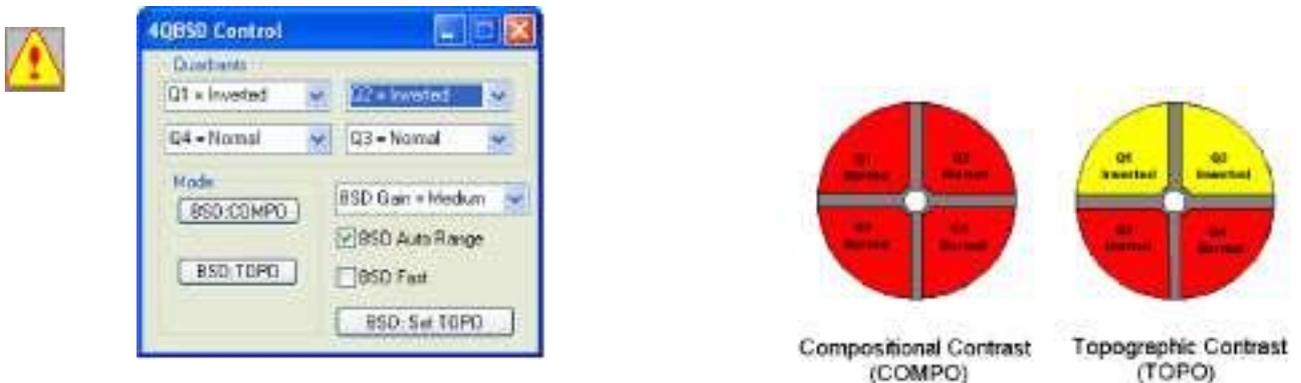


Когда детектор 4QBSD введен под последнюю линзу, убедитесь, что полупроводники не задевают предметный столик. Диоды можно повредить, если острые края образца будут касаться детектора снизу. При работе с образцами различной высоты или при изменении рабочего расстояния, рекомендуют использовать ПЗС-камеру.

Ввод и вывод детектора может привести к кратковременной потере вакуума. Поэтому, разделительный клапан (CSV) должен быть закрыт каждый раз, когда детектор вводится или выводится (см. макропример 5.12.3).

Детектор 4QBSD имеет собственное окно конфигурации, которое открывается с помощью всплывающего меню (*PopUp menu TOOLS^GOTO PANELS 4QBSD CONTROL*). Каждый квадрант детектора (Q1 – Q4) можно настраивать отдельно (Off, Normal или Inverted). Выбирая различные квадранты (Q1 – Q4), осуществляют настройку. Более того, имеется две заданные конфигурации квадрантов. Оптимальная контрастность материала (COMPO) может быть достигнута при нажатии BSD COMPO. При такой установке все диоды переключаются в положение *Normal*, т.е. генерируется суммарный сигнал (см. рис. 46). Для получения оптимального топографического контраста (TOPO), нажмите клавишу BSD:TOPO, чтобы преобразовать сигналы диодов Q1 и Q2 (см. ниже). Это значит, что в этом режиме сигнал от диодов Q1 и Q2 отделяется от сигнала диодов Q3 и Q4. это приводит к сильному подавлению контрастности материала и доминированию топографического контраста (см. рис. 47).

Могут понадобиться другие настройки для режима TOPO, если детектор BSE установлен в особых местах. Настройки можно сохранять, установив значения для различных квадрантов и нажав клавишу *BSD Set TOPO*. Контрольное окно *BSD Gain* показывает диапазон значений тока усилителя. Если экранная кнопка *BSD Auto Range* включена, диапазоны токов усилителя автоматически устанавливаются системой как функция яркости и уровень контраста. Если кнопка *BSD Auto Range* выключена, соответствующий диапазон усиления должен выбираться вручную. Экранная кнопка *BSD Fast* позволяет увеличить полосу пропускания усилителя. Эту кнопку включают для нормальных скоростей оптического сканирования, а при пониженных скоростях сканирования, таких как при подавлении шума, она должна быть отключена.



Диоды детектора 4QBSD также чувствительны к инфракрасному излучению ПЗС-камеры. Работая с этим детектором, всегда проверяйте отключение освещения ПЗС-камеры.



Выключатель (4) AUTO BRIGHTNESS (автоматическая настройка яркости) расположен на пульте управления детектором. При установке детектора на оборудовании серии SUPRA и ULTRA этот выключатель всегда должен быть в выключенном положении.

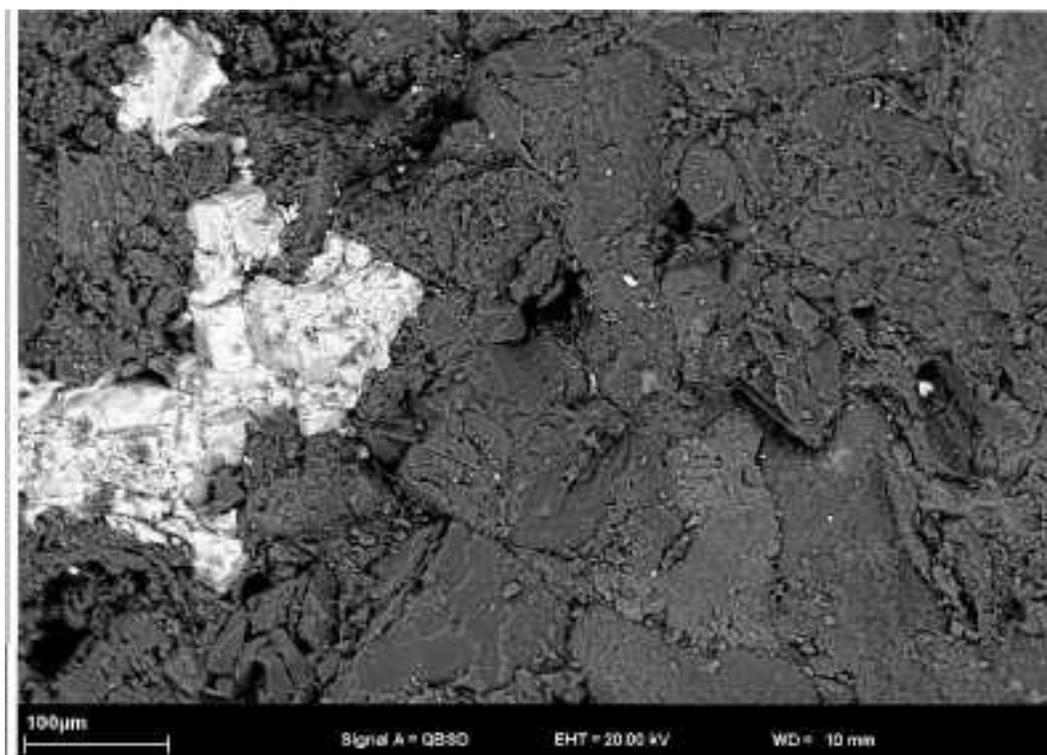


Рис. 46: контрастность материала, детектор 4QBSD

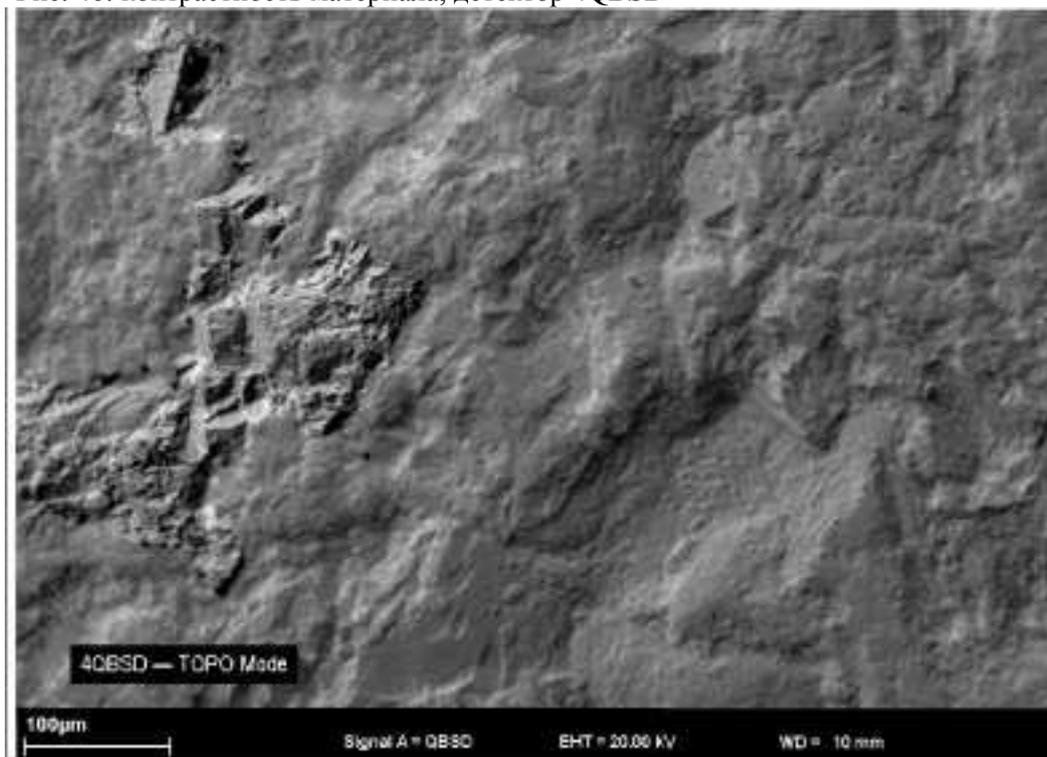


Рис. 47: топографический контраст, детектор 4QBSD

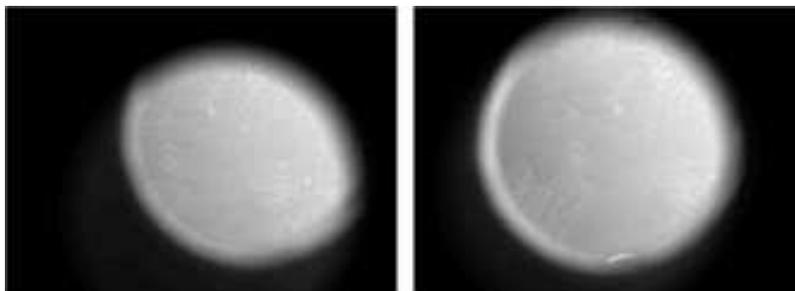
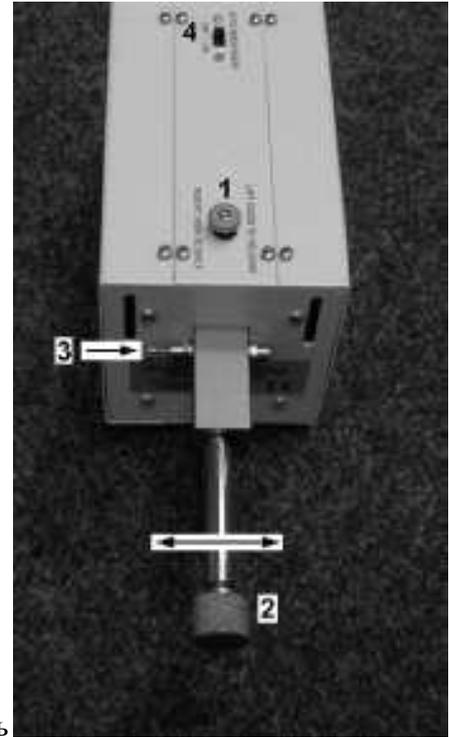
### **Настройка детектора 4QBSD:**

С передней стороны (со стороны камеры) к штанге детектора прикреплено 4 диода. Эти диоды находятся в алюминиевом кожухе (см. рис. выше), который закреплен на штанге детектора с помощью винта (5). Если алюминиевый кожух диодов касается образца, его можно сдвинуть в сторону т.к. он не жестко закреплен на штанге. Он защищает диоды от повреждений.

В таком случае, если положение детектора не отрегулировано, камеру для образца следует провентилировать и вручную настроить положение алюминиевого кожуха. Рекомендуется установить детектор и с помощью зеркала разместить центральное отверстие кожуха прямо под диафрагмой последней линзы, установленной на выходе электронного луча. Работу с кожухом диодов проводят только в перчатках.

Тонкую настройку детектора на прямом изображении проводят следующим образом: устанавливают наименьшее увеличение при относительно большом рабочем расстоянии так, чтобы можно было смотреть прямо через отверстие диафрагмы детектора. Затем детектор настраивают в направлениях X и Y (с учетом направления сканирования электронным лучом) так чтобы изображение отверстия было в центре монитора.

Поворотом винта с накатной головкой (2) можно изменять положение по оси X. Поворотом вправо детектор выводится из камеры для образца (движение вправо на прямом изображении). Поворотом влево детектор глубже вводится в камеру для образца (движение влево на прямом изображении). Чтобы изменить положение по оси Y, нужно поворачивать саму штангу детектора. Если винт (2) поворачивают вправо, то диоды, находящиеся с другой стороны, смещаются влево (на прямом изображении картинка смещается вниз). Если отпустить винт (2), пружина вернет штангу детектора в исходное положение. Регулировочный винт (3) помогает точно определить, на сколько штанга детектора вернулась в исходное положение. Это позволяет точно установить положение детектора по оси Y.



Ненастроенный детектор

настроенный детектор



Ненастроенный детектор сильно влияет на геометрию электронного луча (стигматизм), а, следовательно, и на качество изображения. Чтобы получить оптимальное качество, убедитесь, что правильно отцентрировали детектор в траектории луча. Чтобы минимизировать искажение маркирующего устройства, во многих случаях будет полезно проводить тонкую настройку при сильных увеличениях после осуществления грубой настройки центра диафрагмы детектора.

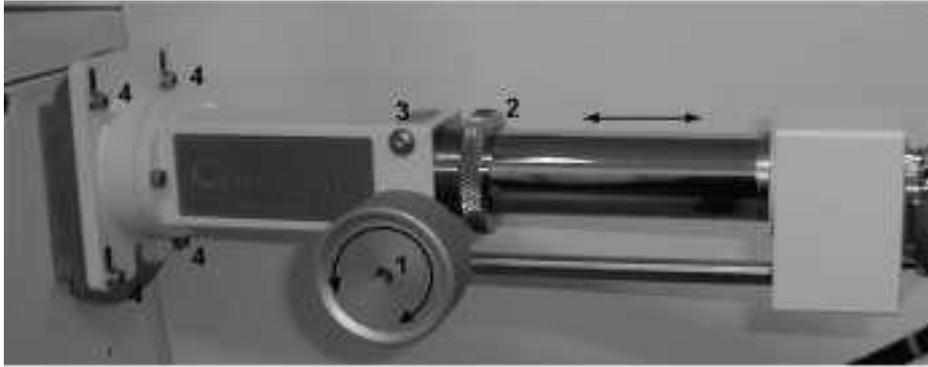
### **2.3.6 Детектор Centaurus**

Для детектирования электронов обратного рассеяния в детекторе Centaurus используется сцинтиллятор. Сцинтиллятор установлен непосредственно под последней линзой. Отверстие в кожухе сцинтиллятора позволяет сканировать образец электронным лучом. Электроны обратного рассеяния генерируют на сцинтилляторе вспышки света, которые с помощью световода передаются на фотоумножитель и там усиливаются.

Чтобы разместить детектор под последней линзой, нужно открыть фиксирующий рычаг (6). Затем, поворачивая вправо до упора колесо (1), в камеру для образца вводят детектор. Следите, чтобы между фиксаторами образца и последней линзой оставалось достаточно места, чтобы избежать повреждений образца и детектора.

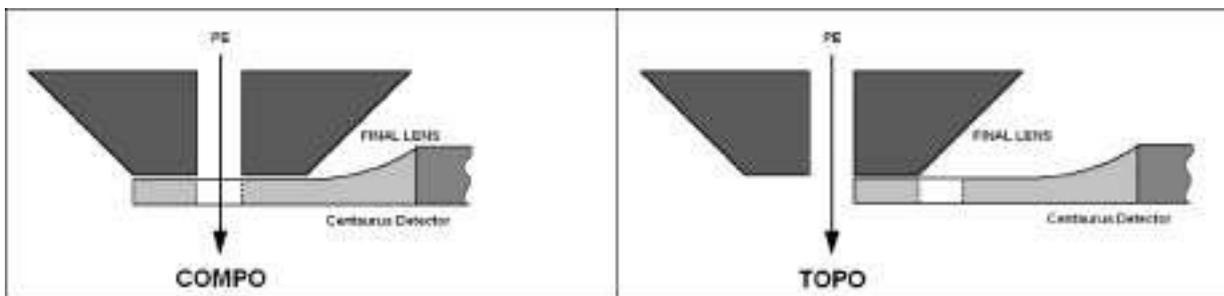
Если детектор не используется, поворотом колеса (1) влево до упора его приводят в положение ожидания.

Затем нужно закрыть фиксирующий рычаг (6), находящийся в передней части штанги: детектор фиксируется в таком положении, чтобы он не смог самопроизвольно попасть в камеру для образца (путем вытягивания вследствие градиента давления между камерой для образца и атмосферой).



 Ввод и вывод детектора в камеру может привести к кратковременной потере вакуума. Поэтому, разделительный клапан (CSV) следует закрывать каждый раз, когда проводятся манипуляции с детектором (см. пример макроса 5.12.3, 1-й пример).

Затем, детектор Centaurus можно настроить как источник сигнала с помощью вкладки *Detectors*, окно *SEM Control*. Также как в случае с детектором 4QBSD, для данного детектора имеются два рабочих режима: контраст материала (COMPO) и топографический контраст (ТОПО). Однако эти режимы активизируются не путем включения специальных диодов, как для детектора 4QBSD, а сменой ориентации сцинтиллятора относительно поверхности образца. Если детектор полностью введен в камеру для образца, сцинтиллятор будет расположен по центру, под последней линзой. В таком положении детектор работает в так называемом режиме контраста материала (см. рис. 48). Если на образце присутствуют различные фазы, то те которые имеют более высокое среднее атомное число, отличаются более ярким контрастом, чем фазы с более низким атомным числом.



В этом рабочем режиме топография образца сильно заглушена. Однако если нужно проанализировать топографию, сцинтиллятор следует поместить рядом с электронным лучом для того, чтобы изменить угол обзора детектора (боковое освещение) и улучшить изображение топографии (рис. 49). Фактический контраст материала сильно заглушен вследствие бокового освещения изображения. Чтобы устойчиво поместить детектор возле последней линзы, рычаг закрепляют в конце штанги детектора (5). Когда рычаг поднят, полностью ввести детектор в камеру для образца невозможно и тем самым обеспечивается его положение рядом с последней линзой.



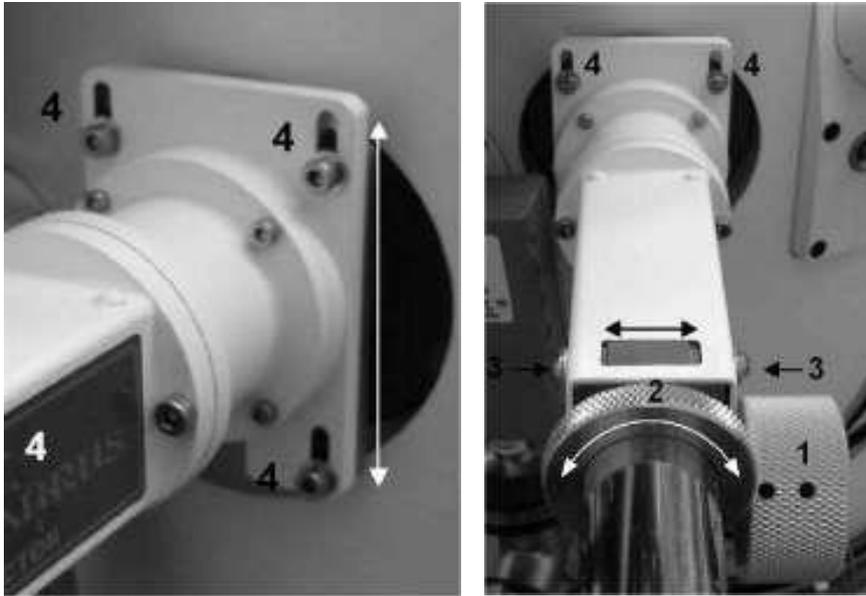
### **Настройка детектора Centaurus:**

Детектор можно настраивать по оси X, Y, Z. Чтобы изменить направление Z, ослабьте четыре винта (4), до начала вентиляции камеры для образца. Затем весь детектор можно поднимать или опускать в пределах длинных отверстий, чтобы выбрать положение сцинтиллятора под последней линзой. Убедитесь, что сцинтиллятор находится максимально близко к последней линзе, однако не касается ее!

Детектор выравнивают в направлении X и Y (направление сканирования) на прямом изображении при слабом увеличении и большом рабочем расстоянии (см. настройку детектора 4BSD). Чтобы настроить направление Y используют винты (3), которые обеспечивают поворот штанги детектора, а прямое изображение при этом поднимается или опускается на экране. Поворотом винта (2) настраивают глубину ввода штанги детектора в камеру для образца. Если винт поворачивают вправо, детектор вводится глубже

(на прямом изображении смещение влево). Если винт поворачивают влево, наблюдается смещение вправо.

 Ненастроенный детектор сильно влияет на геометрию электронного луча (стигматизм), а, следовательно, и на качество изображения. Чтобы получить оптимальное качество, убедитесь, что правильно отцентрировали детектор в траектории луча. Чтобы минимизировать искажение стигматора, во многих случаях будет полезно проводить тонкую настройку при сильных увеличениях после осуществления грубой настройки центра диафрагмы детектора.



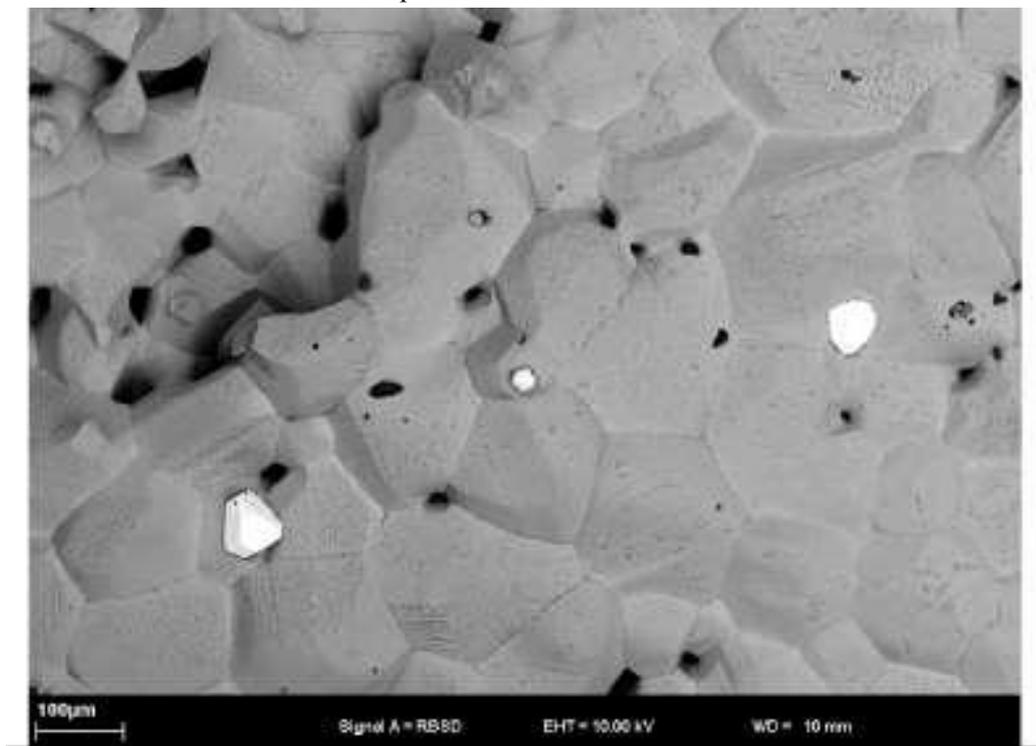


Рис. 48: контрастность материала, полученная с помощью детектора Centaurus

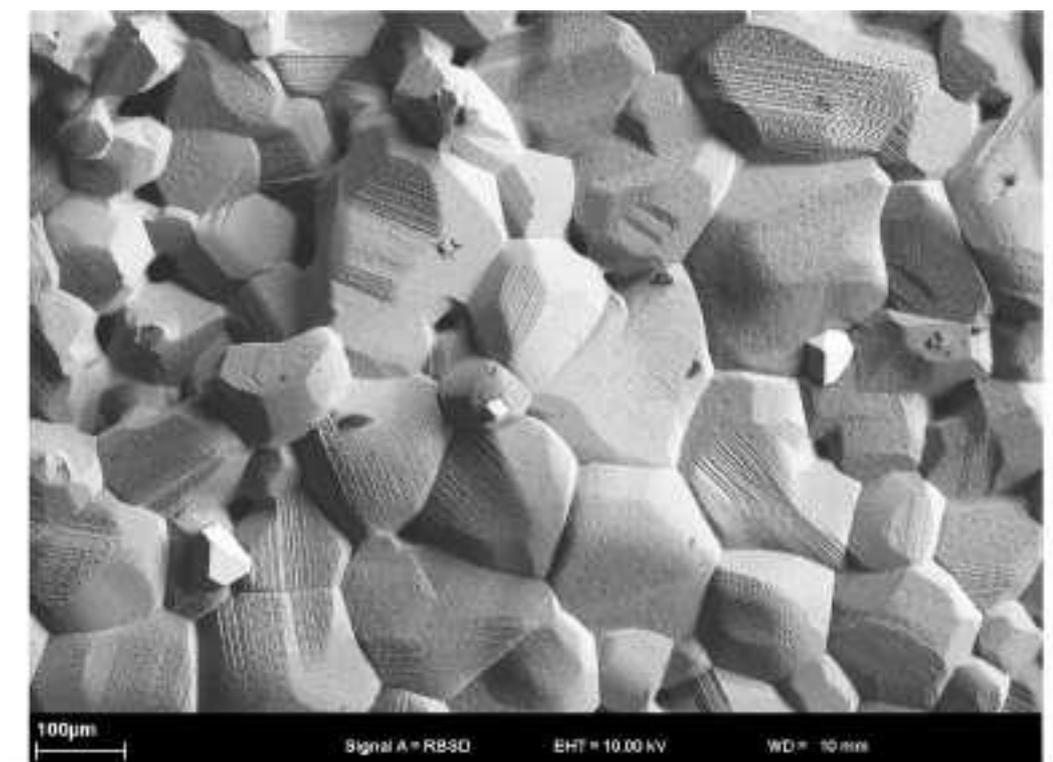
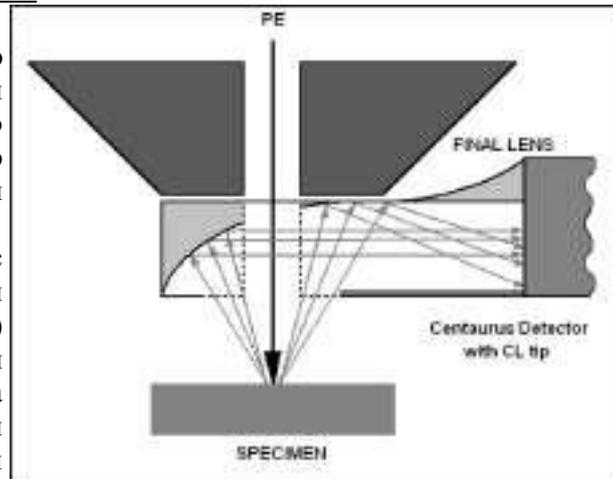


Рис. 49: топографический контраст, полученный с помощью детектора Centaurus

## Использование детектора Centaurus в качестве детектора CL

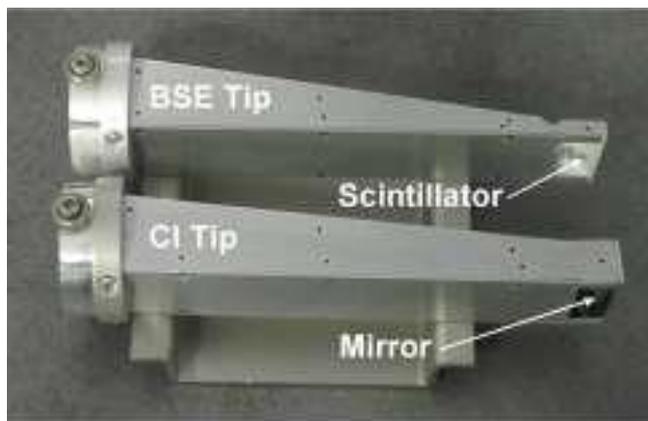
Заменяв наконечник, детектор Centaurus можно использовать как простой катодолюминесцентный детектор. На световоде/ фотоумножителе по умолчанию установлен наконечник BSE с сцинтиллятором. Его можно заменить наконечником CL со встроенным зеркалом вместо сцинтиллятора.

Вследствие взаимодействия первичных электронов с электронами валентной зоны, различные материалы (напр., полупроводники, изоляторы, минералы и т.д.) могут излучать свет в видимом и ультрафиолетовом диапазонах. Этот свет с помощью зеркала отражается на фотоумножитель, где информация усиливается и выходит в виде электронного сигнала. Т.к. для детектирования с помощью CL можно использовать



только относительно небольшой пространственный угол, нужен относительно сильный зондовый ток (апертура 60/120  $\mu\text{m}$ , сильный ток) для получения достаточного соотношения сигнал/шум.

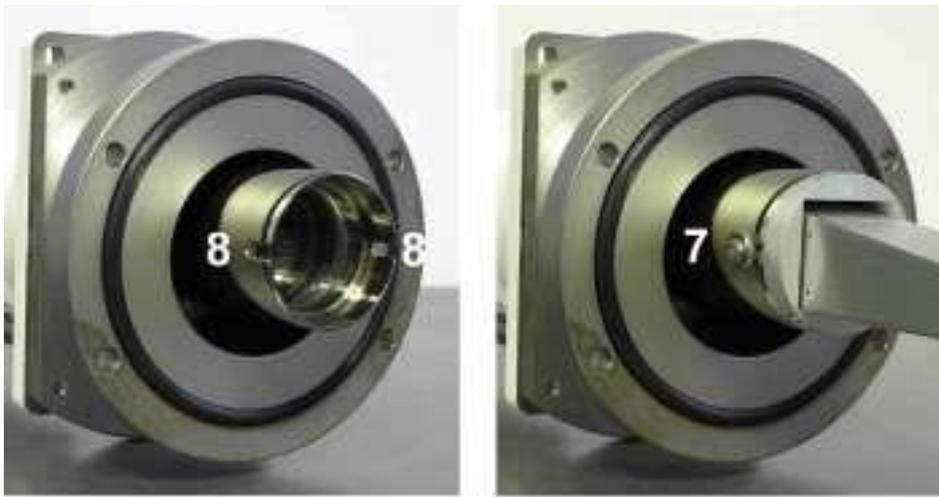
Встраивание зеркала в наконечник приводит к увеличению толщины наконечника в три раза, и в связи с этим сильно уменьшается наименьшее рабочее расстояние. Поэтому, для детектора CL рекомендуют выбирать рабочее расстояние 15-20 мм. В зависимости от образца и цели исследования, ускоряющее напряжение величиной 10-30 кВ рекомендуется в большинстве случаев.



Соответствующий наконечник одевается непосредственно на световод/ фотоумножитель и закрепляется с помощью двух винтов (7). При смене наконечника следует проветрить камеру для образца, перед тем как детектор наполовину вставлен в камеру для образца. Чтобы для сборки было достаточно места, предметный столик смещают, два винта (7) отвинчивают и затем наконечник вытягивают в направлении вперед. Перед установкой нового наконечника, два винта (7) нужно немного ослабить (1,5 поворота). Затем можно вставить новый наконечник, а два винта (7) наживляют в пазах (8). Для фиксации нового наконечника оба винта (7) затягивают вручную.

 После установки наконечника CL, высоту детектора (см. выше: "настройка детектора Centaurus") настраивают заново с помощью винтов (4). Затем детектор центрируют с помощью винтов (2) и (3). Оптимальная настройка поможет избежать плохого качества изображения.

 Чтобы избежать загрязнения детектора и камеры для образца, установку наконечника следует проводить в перчатках. Снятый наконечник хранят так, чтобы он был защищен от пыли и влаги.

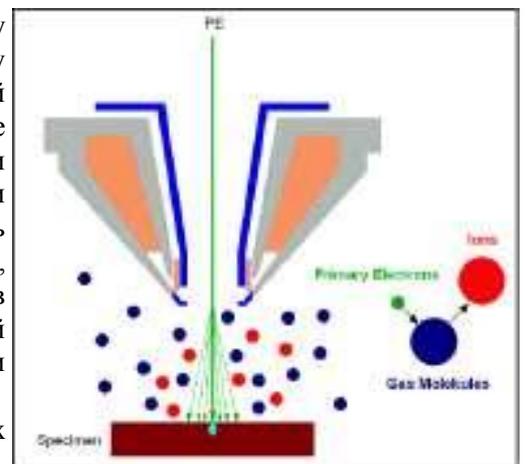


## 2.4 Работа в режиме VP

Режим VP (переменное давление) позволяет анализировать и отображать непроводящие, сильно газящие или влажные образцы без предварительного осаждения испарений или другой подготовительной работы. Это достигается с помощью дифференциальной системы откачки, которая позволяет создать парциальное давление величиной 1 – 133 Па в камере для образца, при этом поддерживая высокий вакуум или сверхвысокий вакуум в зоне расположения пушки и на пути прохождения луча сканирующего электронного микроскопа.

### 2.4.1 Принцип VP

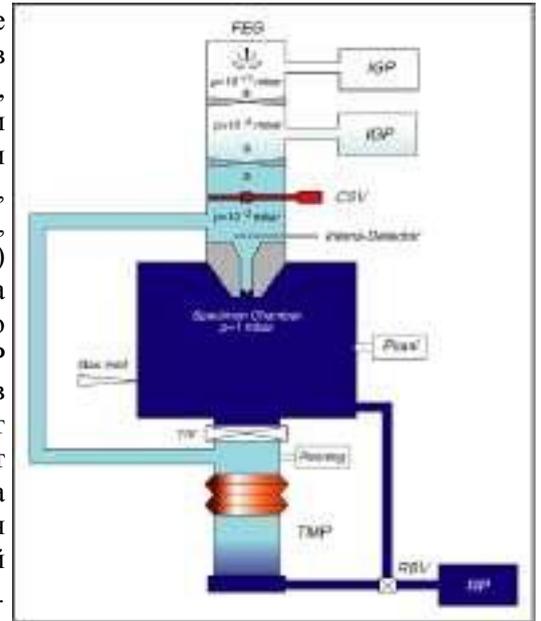
Остаточная газовая атмосфера в камере для образца создает зону взаимодействия электронов / молекул остаточного газа между поверхностью образца и выходом электронов (последней линзой). В этой зоне электроны первичного пучка, имеющие высокую энергию, сталкиваются с молекулами остаточного газа и ионизируют их. Образовавшиеся ионы участвуют в компенсации отрицательного заряда образца. С другой стороны, часть электронного луча рассеивается (эффект юбки). Электроны, которые теряются таким образом и не попадают в сфокусированный пучок электронов не несут никакой особой информации о поверхности и участвуют в формировании фонового сигнала с ограниченным разрешением.



Хотя потери на утечку допускаются в пределах до нескольких гПа, важнейшие параметры (такие как ускоряющее напряжение, давление в камере для образца и траектория первичных электронов, столкнувшихся с остаточным газом) по возможности должны быть точно подобраны. Обычно оптимизируют такие параметры как достижимое разрешение и соотношение сигнал/шум. На рис. 50 и 51 показаны примеры компенсации зарядов. В режиме высокого вакуума (рис. 50) получают плохое изображение образца при рабочих параметрах (20 кВ, апертура 30мкм), необходимых для данного назначения. Даже при очень больших скоростях сканирования эффекты зарядов проявляются настолько сильно, что хорошее качество изображения получить невозможно. Однако в режиме VP (рис. 51) при давлении 21 Па эти заряды можно полностью компенсировать, хотя повышенное давление в камере для образца ухудшает соотношение сигнал/шум. Этот эффект можно компенсировать подавлением шума (более продолжительное время задержки).

## 2.4.2 Система вакуума

Система СЭМ с опцией VP показана на схеме ниже. Ее основные отличия от обычной системы СЭМ состоят в использовании второго ионного геттерного насоса (IGP), байпаса между электронной оптикой и турбомолекулярным насосом (TMP), байпаса между камерой для образца и форвакуумным насосом вместе с реверсивным клапаном, игольчатым клапаном с электронным управлением, расположенным на камере для образца (газовпускной патрубок) и разделительным клапаном между TMP и камерой для образца (TIV – турбо стопорный клапан). При работе в режиме высокого вакуума запускается форвакуумный насос и на выходе TMP создается предварительный вакуум. Затем количество оборотов насоса TMP возрастает до тех пор, пока не будет достигнут предельный вакуум. Вакуум в камере для образца измеряют вакуумметром Пеннинга. Выпуск вакуума осуществляют когда достигнуто значение минимум  $1 \cdot 10^{-4}$  мбар. Затем открывается разделительный клапан (CSV) между зоной пушки и камерой для образца; теперь можно включать ускоряющее напряжение.



Если с помощью программного обеспечения выбран режим VP (*Vacuum PopUp Menu* -> *VP Control*), ускоряющее напряжение отключается. Это происходит потому, что усилитель пучка в режиме VP должен быть отключен. Затем перед закрытием разделительного клапана между камерой для образца и насосом TMP значение ускоряющего напряжения возвращаются к фактическому значению. Реверсивный клапан (RBV) установлен таким образом, что форвакуумный насос соединен с насосом TMP и камерой для образца. Полная камера для образца т.о. отделена от насоса TMP и откачивается только форвакуумным насосом. Нижняя часть электронной оптики остается связанной с насосом TMP с помощью байпаса. Этот байпас, несколько ограничивающих давление диафрагм, установленных на оптике и второй насос IGP обеспечивают в зоне пушки сверхвысокий вакуум величиной как минимум  $10^{-9}$  мбар.

В окне *VP Control* можно установить необходимое для данного назначения давление камеры для образца. Если фактическое значение (*Chamber=*) ниже, чем заданное значение (*VP Target =*), атмосферный воздух / азот впускается в камеру для образца через игольчатый клапан до тех пор, пока не установится необходимое давление. Текущее значение давления в камере для образца измеряют вакуумметром Пирани. Если заданное значение ниже текущего, игольчатый клапан остается закрытым, форвакуумный насос проводит откачку до тех пор, пока давление не достигнет необходимой величины.



Более высокое давление в камере для образца устанавливается очень быстро (в течение нескольких секунд), т.к. для этого требуется только открыть игольчатый клапан. Однако, если высокое давление (напр., 100 Па) снова нужно понизить, это займет определенное время (до 1 минуты), т.к. сначала с помощью форвакуума нужно откачать воздух из камеры для образца.



Начав процедуру откачки, можно также активировать режим VP, выбрав опцию *Go to VP* в окне *VP Control*. Тогда не переходя в режим HV, начинается откачка воздуха до момента достижения установленного значения давления.

Переключение из режима VP в режим HV производится нажатием кнопки *Go To HV* в окне *VP Control*. При этом отключается ускоряющее напряжение и закрывается разделительный клапан (CSV), находящийся между зоной пушки и камерой для образца. Это осуществляется с целью обеспечения безопасности, т.к. разделительный клапан между камерой для образца и насосом TMP снова открывается. Т.к. в камере для образца вакуум относительно низкий, открытие разделительного клапана с помощью байпаса между насосом TMP и зоной колонны может привести к потере вакуума в зоне пушки и повреждению наконечника. Во избежание этого разделительный клапан закрывается автоматически. Откачку в камере для образца проводят до наименьшего возможного давления с помощью форвакуумного насоса. Затем разделительный клапан между насосом TMP и камерой для образца открывается, а разделительный клапан (RBV) настроен таким образом, что форвакуумный насос остается соединенным с насосом TMP. Когда во всей системе достигается высокий вакуум, разделительный клапан (CSV) автоматически открывается и включаются усилитель пучка и ускоряющее напряжение.



Компенсация зарядов в режиме VP

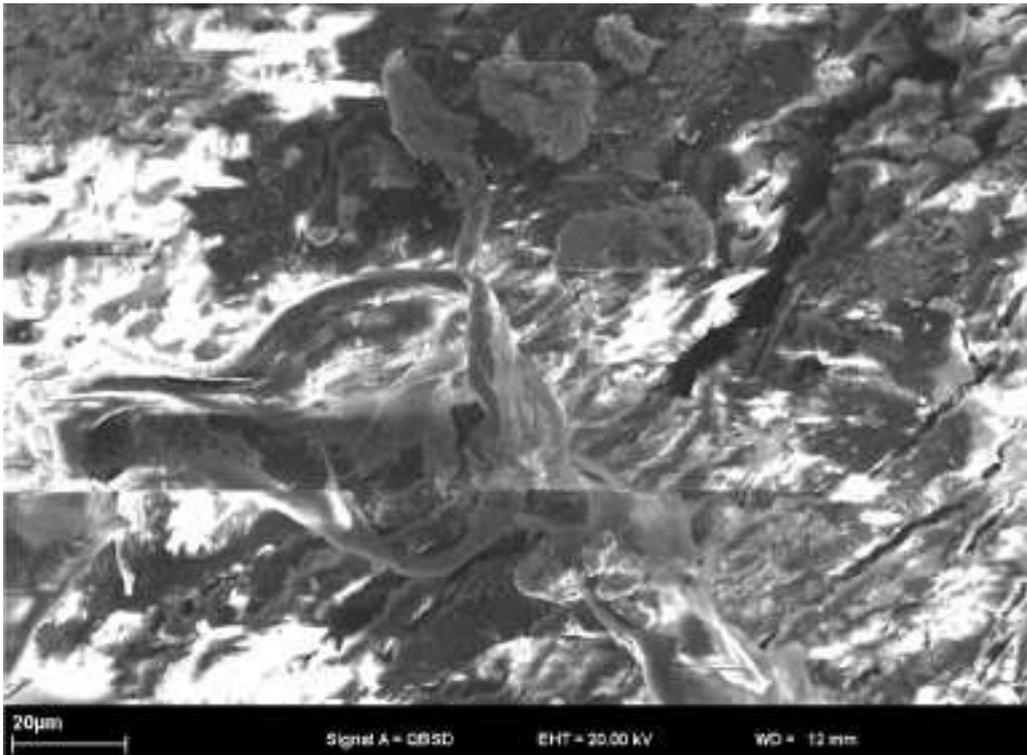


Рис. 50: непроводящий образец, исследуемый в режиме HV, сильные заряды, электронный луч искажен, высокое качество изображения не достижимо

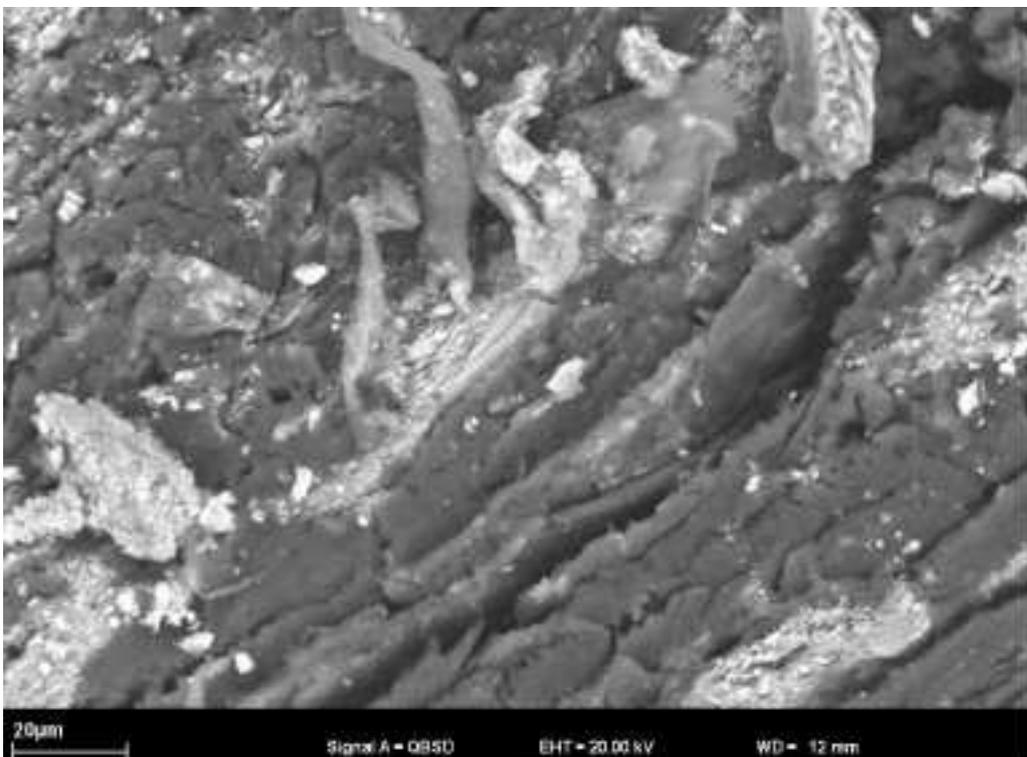
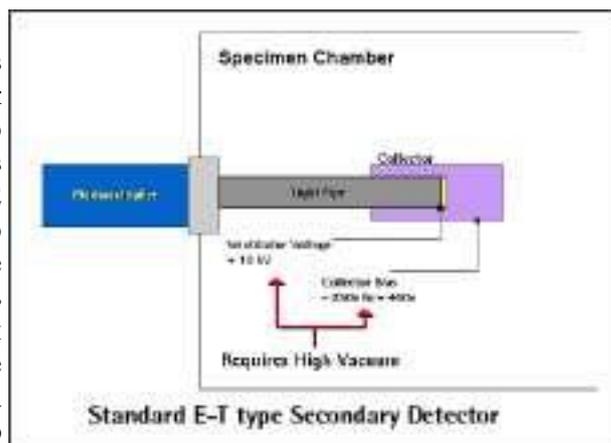


Рис. 51: непроводящий образец, исследованный в режиме VP при токе 21пА. Заряды полностью компенсируются, изображение формируется легко.

### 2.4.3 Детектирование в режиме VP

Детекторы вторичных электронов (встроенный в линзу/SE2) используют в основном как источник сигнала в режиме HV. В режиме VP с этой целью часто используют детекторы электронов обратного рассеяния или VPSE. Детектор SE2 можно использовать только в режиме высокого вакуума, т.к. необходимое напряжение сцинтиллятора 10 кВ в режиме VP должно быть отключено для того, чтобы избежать появления на детекторе высоковольтной дуги (парциальное давление в камере для образца). Когда напряжение сцинтиллятора отключено эффективность детектирования сильно



ухудшается, однако, невозможно использовать этот детектор как источник сигнала в режиме VP. То же относится к встроенному в линзу детектору. Высокая эффективность детектирования для этого детектора достигается в основном благодаря усилителю пучка, который также должен быть отключен в режиме VP, когда давление в камере для образца повышено.

Главным параметром в режиме VP при компенсации зарядов на образце и проведении анализа является заданное давление в камере для образца. Чем выше давление в камере для образца, тем больше молекул остаточного газа может быть ионизировано пучком первичных электронов и тем больше образуется положительных зарядов для компенсации заряда на образце. Однако с увеличением давления увеличивается также и поперечное сечение области рассеивания пучка, что влияет на доступное разрешение и соотношение сигнал/шум. Оптимальное давление (которое должно быть минимальным, но достаточным для высокой компенсации зарядов) всегда следует выбирать в зависимости от назначения исследования. Соответствующие образцы показаны на рис. 52-54.

Если образец сухой и не имеет полостей, и нет опасности его высыхания или образования артефактов, в камере для образца устанавливают минимальное давление, позволяющее получить наилучшее соотношение сигнал/шум и наилучшее разрешение. Если во время микроскопического исследования возникают заряды, давление увеличивают с малым шагом (5-10 Па) до тех пор, пока заряды не будут скомпенсированы. Это позволяет быстро определить оптимальное давление. Однако, если анализируемые образцы влажные, в вакууме произойдет их обезвоживание, поэтому анализ начинают при гораздо более высоком давлении (в большинстве случаев оно составляет 100 или 133 Па), чтобы свести к минимуму процесс высыхания. Обычно, в таких случаях требуется наличие охлаждаемого предметного столика (см. 6.3), который позволит охладить образец до  $-20^{\circ}$ . Т.о., образец можно стабилизировать на определенный период времени. Оптимальное давление определяется не наилучшим разрешением или наилучшим соотношением сигнал/шум, а типом образца и назначением исследования. Однако оптимальное давление следует устанавливать так, чтобы обеспечить наилучшее качество изображения.

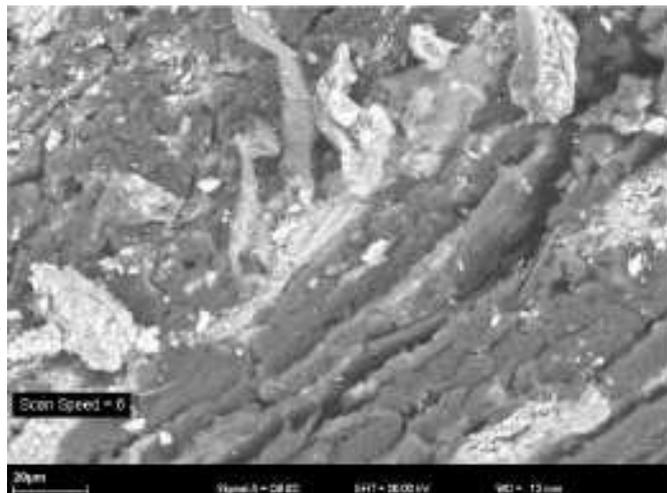
Т.к. в режиме VP соотношение сигнал/шум всегда хуже, чем при аналогичных целях исследования в режиме HV, электронно-оптические параметры подбирают соответствующим образом. Поэтому для подавления шума часто рекомендуется использовать более высокое ускоряющее напряжение и зондовый ток, и более продолжительное время задержки.

### Соотношение сигнал/шум как функция заданного давления.

**Рис. 52:** непроводящий образец в режиме VP

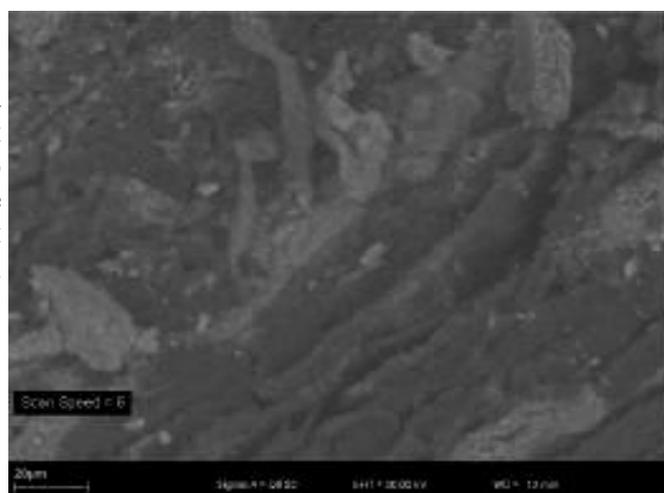
Все три изображения были получены при одной и той же скорости сканирования и одних и тех же значениях яркости и контрастности. Изменялось только давление в камере для образца.

При давлении в камере для образца 20 Па компенсируются все заряды. Соотношение сигнал/шум достаточно хорошее при этой скорости сканирования. Нет необходимости устанавливать более высокое давление.



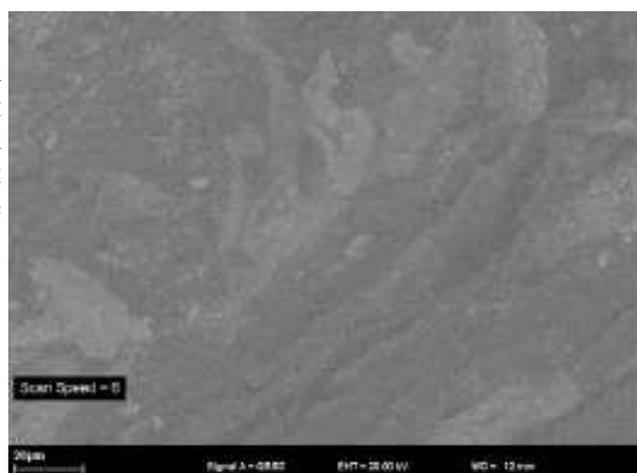
**Рис. 53:** тот же образец при 80 Па

Увеличение давления будет влиять только на соотношение сигнал/шум, не улучшая компенсацию зарядов, которые полностью исчезают при давлении 20 Па. Увеличение контраста и уменьшение скорости сканирования могут обеспечить изображение без шума, аналогичное изображению, показанному выше.



**Рис. 54:** тот же образец при 133 Па

Очень высокое давление в камере для образца приводит к значительному увеличению рассеяния в поперечном сечении луча первичных электронов. Даже подавление шума или увеличение контраста не позволят получить то же качество изображения, как на рис. 52.



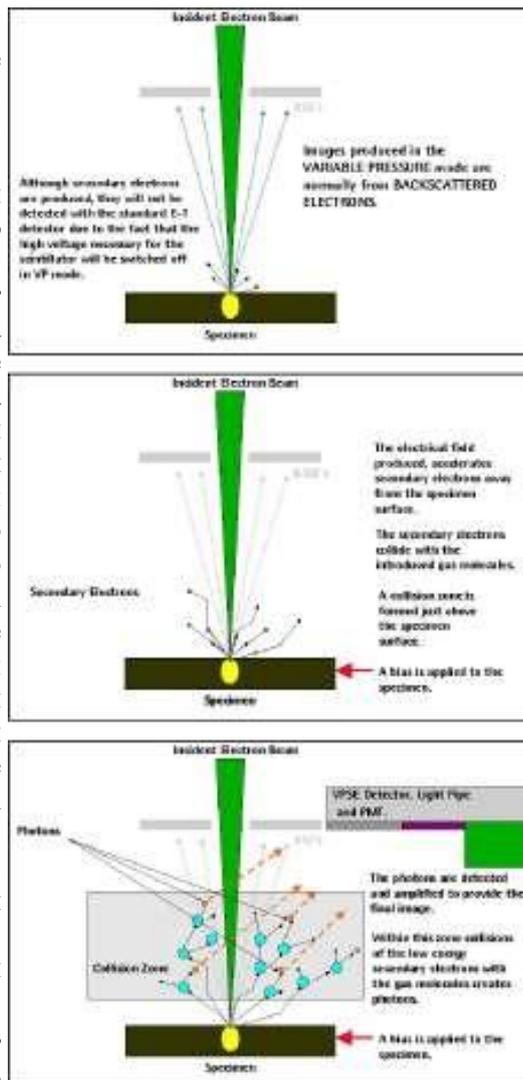
## Детектор VPSE

Детектор VPSE – это особым образом установленные детекторы, позволяющие получить изображение, подобное изображению от SE электронов в режиме VP. Детектирование основано на электрическом потенциале, созданном между держателем образца/образцом и световодом детектора VPSE. Значение этого электрического поля можно задать с помощью напряжения коллектора (*Collector Bias* - *напряжение смещения коллектора*), если в качестве источника сигнала выбран VPSE. Образовавшиеся на образце электроны SE ускоряются в направлении детектора VPSE. Вследствие наличия остаточной газовой атмосферы между поверхностью образца и детектором VPSE, существует большая вероятность того, что эти электроны будут соударяться с молекулами остаточного газа. В отличие от электронов первичного электронного луча и образующихся электронов BSE, энергия этих электронов SE является относительно низкой (не более 400 В), поэтому, в результате таких столкновений ионы не образуются, однако наблюдается свечение молекул остаточного газа. Образующиеся фотоны регистрируются детектором VPSE. Источник сигнала не может быть обнаружен непосредственно в электронах SE, он обнаруживается в их вторичных продуктах, которые образуются в ходе этого процесса. Поэтому, детектирование VPSE также называют аналогом изображений SE.

Главным преимуществом этого метода создания изображений является объем получаемой информации. Как объясняется в 5.1.1, электроны BSE образуются в более глубоком слое образца, чем электроны SE. Т.о., изображения, получаемые с помощью электронов BSE, несут глубинную информацию (в зависимости от материала, ETH и т.д.), а не информацию о поверхностной структуре образца. Изображения, аналогичные изображениям от электронов SE, содержат информацию, аналогичную той, которую получают в режиме высокого вакуума, т.к. принцип детектирования основан на механизмах сравнения контрастности.

При использовании детектора VPSE важно знать, что для создания достаточного количества фотонов в зоне возбуждения, обеспечивающего успешное детектирование с помощью детектора VPSE, в камере для образца необходимо установить определенное давление. Если количество молекул остаточного газа слишком мало, вероятность столкновений и, следовательно, эффективность детектора будет снижена. В зависимости от использованного образца и набора рабочих параметров, часто, оптимальное детектирование возможно в диапазоне 20-60 Па. Примеры показаны на рис. 58 – 60. Компенсация зарядов на этом образце возможна уже при 10 Па (рис. 58). Однако, при таких условиях наблюдается низкий контраст изображения. Когда давление увеличивается на 10 Па, сигнал тоже усиливается (рис. 59). Увеличение давления еще на 10 Па (рис. 60) приводит к значительному улучшению контраста и сигнала. Однако, увеличенное давление будет способствовать усилению процессов рассеяния и, т.о., снижению соотношения сигнал/шум. Поэтому, необходимо добиться компромисса, когда будет происходить компенсация зарядов и установится достаточный контраст при допустимом соотношении сигнал/шум.

Следующий ключевой параметр – это время задержки электронного луча на сканируемом элементе. Если время задержки слишком короткое (высокая скорость сканирования), каскад, необходимый для появления фотонов, не образуется. Это снижает эффективность детектора. Если время задержки слишком большое (низкая скорость сканирования), на поверхность образца за единицу времени воздействует очень высокая энергия. Это может привести к образованию



зарядов или к чрезмерному воздействию на поверхность образца, которое может вызвать радиационное разрушение. Поэтому, наилучшую скорость сканирования для образца подбирают в зависимости от материала образца. Во многих случаях полезно пользоваться функцией *Line Avg.* (линейная интеграция, см. 5.1.2), т.к. деформация образца будет меньше, чем в случае очень низкой скорости сканирования (напр., скорость сканирования 12 или 13).

Третьим ключевым параметром является напряжение на коллекторе, определяющее электрическое поле между держателем образца/образцом и детектором VPSE. В большинстве случаев используют напряжение в диапазоне 360 – 390 В. Если напряжение слишком низкое, эффективность детектора VPSE очень сильно снижается. В зависимости от используемого образца, заданного ускоряющего напряжения, зондового тока и заданного давления в камере для образца, при очень высоком напряжении разряд также может возникать между образцом и детектором. Это приводит к появлению на изображении очень ярких повторяющихся линий, так что получение изображения образца становится невозможным. Соответствующие образцы показаны на рис. 55 – 57. В этом случае, параметры следует оптимизировать либо снижая напряжение коллектора до момента прекращения образования разрядов, либо снижая давление в камере для образца. Оба изменения, однако, влияют на эффективность детектора и компенсацию зарядов. Поэтому, для каждого образца и назначения исследования следует решать, какой параметр нужно изменять. Во многих случаях меняют напряжения коллектора, т.к. уменьшение давления часто приводит к образованию новых зарядов. С другой стороны, при очень низком давлении уменьшается контраст детектора. Если установлено достаточное соотношение сигнал/шум, можно также попытаться снизить зондовый ток и ускоряющее напряжение для того, чтобы сократить количество разрядов.

Для других рабочих параметров (т.е. для ускоряющего напряжения, зондового тока и рабочего расстояния) устанавливают те же рекомендуемые значения, что и для детектора SE2. Однако из-за наихудшего соотношения сигнал/шум для ускоряющего напряжения и зондового тока в режиме VP часто устанавливают немного более высокие значения. Не следует устанавливать слишком малое рабочее расстояние, чтобы избежать эффектов затенения. Если рабочее расстояние слишком короткое, сокращается зона взаимодействия электронов SE/молекул остаточного газа, что приведет к ослаблению выходящего сигнала.

Ниже приведенная таблица содержит некоторые рекомендуемые значения для работы детекторов VPSE и BSE в режиме VP.

параметр	Оптимальные условия/ аннотации
Ускоряющее напряжение: 5 кВ – 30 кВ 7 кВ – 25 кВ 2 кВ – 30 кВ 3 кВ – 7 кВ  7 кВ – 25 кВ	Основной диапазон применения для детектора BSE Стандартное применение детектора BSE Возможный диапазон применения детектора VPSE; Однако достаточный контраст может быть достигнут только при более высоких напряжениях Используется при низких напряжениях с детектором VPSE Стандартное использование VPSE
Рабочее расстояние: 7 – 12 мм 6 – 8 мм 8 – 15 мм	Для детектора BSE, в большинстве случаев, рекомендуется 9 мм Для VPSE используют при низких напряжениях (3 – 7 кВ) Для VPSE при стандартном использовании (7-25 кВ)
Апертура 30 мкм 7,5 – 20 мкм 60 мкм 120 мкм	Для большинства случаев стандартная апертура достаточна. При использовании этих апертур зондовый ток часто слишком мал, чтобы обеспечить достаточное соотношение сигнал/шум и необходимый контраст Часто более высокий зондовый ток улучшает достигаемый контраст Часто рекомендуется только для решения аналитических задач
Наклон образца:	По возможности нужно избегать сильного наклона образца. Для VPSE небольшой наклон может улучшить эффективность прибора
Рабочий режим:	Детектор BSE подходит для режима VP и режима высокого вакуума. Исключение: т.к. VPSE обнаруживает свет в режиме высокого вакуума его можно использовать как простой детектор CL

## Разряд между образцом и детектором VPSE

Рис. 55:

На этом образце сильный разряд можно наблюдать при напряжении коллектора 319 В и давлении 41 Па (яркие полосы)

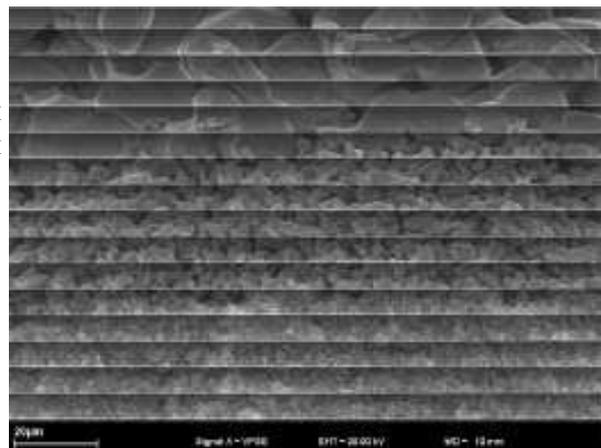


Рис. 56:

Уменьшение напряжения коллектора с 391В до 341 В приводит к полной компенсации разрядов при давлении 41 Па

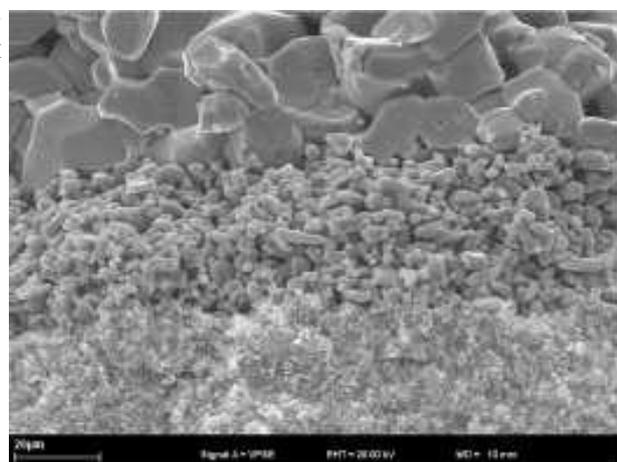


Рис. 57:

Уменьшение давления в камере для образца с 41 Па до 21 Па приводит к полной компенсации разрядов при напряжении коллектора 391 В.

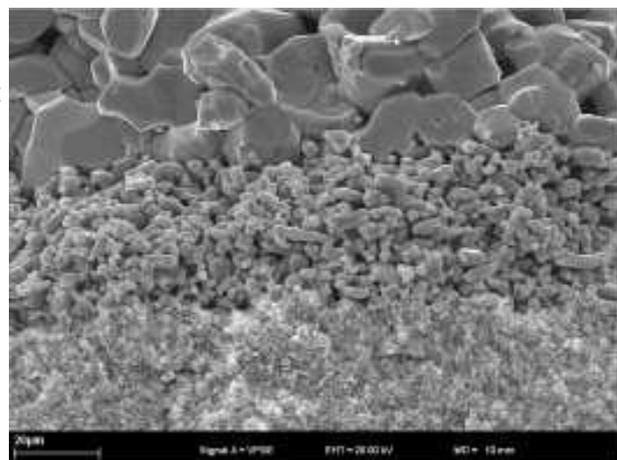


Рис. 58:

Все три изображения были получены при одной и той же скорости сканирования и одних и те же значениях яркости и контрастности. Менялось только давление в камере для образца.

Давление 10 Па слишком низкое, сигнал на выходе детектора очень слабый

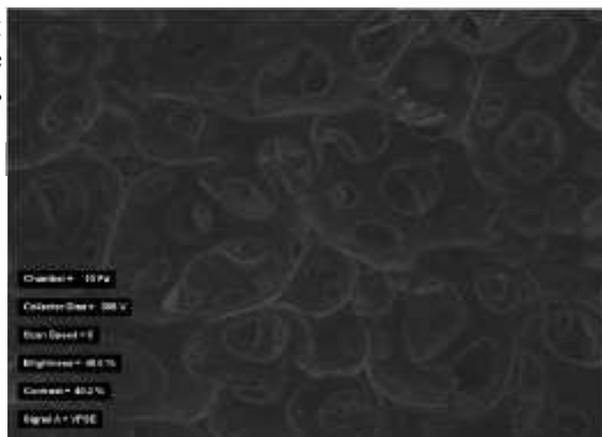


Рис. 59:

Сильный выходной сигнал при 20 Па.

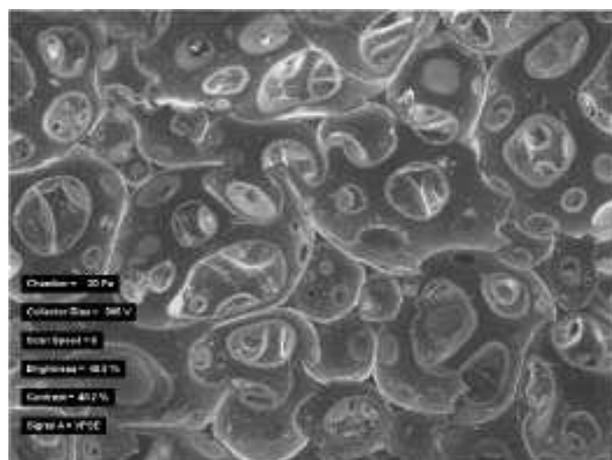


Рис. 60:

Значительно усиленный выходной сигнал при 30 Па, улучшенная контрастность

