

УДК 537.533.3

© С. О. Вересов, О. М. Горбенко, А. О. Голубок, 2025

НИЗКОВОЛЬТНЫЕ МИНИАТЮРИЗОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ОБЗОР

Низковольтные миниатюризованные электронно-оптические системы, которые также называют микроколоннами, представляют собой самостоятельное направление в области электронной оптики и являются основой низковольтных миниатюрных электронных микроскопов, многоколоночных литографов и систем электронной голографии. В обзоре собраны работы по микроколоннам с различными электронно-оптическими схемами, включая моделирование распределения электрического поля, электронных траекторий, аберраций и пространственного разрешения, а также описание используемых электронных источников и технологий изготовления микроколонн.

Ключевые слова: низковольтная электронная микроскопия, миниатюрные электронно-оптические системы, микроколонны, электростатические микролинзы, точечные источники электронов, пространственное разрешение, аберрации электронно-оптических систем, групповые технологии микроэлектроники, кремниевые технологии

ВВЕДЕНИЕ

Электронная микроскопия имеет столетний путь развития. Первые изображения, полученные с помощью электронного пучка на флуоресцентном экране в стеклянной колбе, из которой был откачан воздух, значительно уступали по качеству оптическим изображениям. Но в 1931 г. в Германии Макс Кноль и Эрнст Руска [1] создали прототип современного электронного микроскопа (ЭМ) с магнитными линзами и пространственным разрешением, превышающим разрешение оптического микроскопа, а уже в 1939 г. началось изготовление промышленных образцов. Современный ЭМ имеет пространственное разрешение, позволяющее наблюдать отдельные атомы, и используется в различных областях науки и технологии, от материаловедения до цитологии и электронной литографии. Для получения атомного пространственного разрешения создают высоковольтные крупногабаритные ЭМ с энергией сфокусированного электронного пучка (10^5 – 10^6) эВ. Вместе с тем ЭМ, использующие низкоэнергетические электронные пучки, имеют определенные преимущества, среди которых неразрушающее воздействие на образец, повышенный контраст изображения [2], обусловленный проникновением электронов лишь в поверхностные слои образца (рис. 1), и возможность использования плохо проводящих образцов без напыления металлических покрытий. Уже в 1940-х гг. появились ЭМ, работающие при пониженном напряжении [3, 4], однако это по-преж-

нему были крупногабаритные и дорогостоящие приборы. Вместе с тем, согласно принципу масштабирования электронно-оптических систем (ЭОС), при одновременном уменьшении всех геометрических характеристик и напряжений на электродах сохраняются фокусирующие свойства системы. Поэтому, начиная с конца 1980-х гг., стали создавать миниатюрные низковольтные и, естественно, более дешевые ЭОС [5–14]. Важным достоинством миниатюризованной электронно-оптической системы (МЭОС) является уменьшение аберраций и снижение требований к вакуумной системе. Обычно МЭОС изготавливаются с использованием электростатических линз, т.к. они легче поддаются миниатюризации. Основным недостатком МЭОС является малое фокусное расстояние. Поскольку аберрации увеличиваются при отклонении пучка от оптической оси, это накладывает ограничение на угол отклонения и, вследствие малого фокусного расстояния, приводит к уменьшению площади обзорного кадра. При изготовлении МЭОС используются как традиционные технологии точного машиностроения, так и групповые кремниевые технологии микроэлектроники. Последнее обстоятельство открывает путь к созданию многоколоночных МЭОС, представляющих особый интерес для электронной литографии в связи с возможностью революционного увеличения ее производительности. В 1986 г. Эрнст Руска вместе с изобретателями сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) Гердом Биннигом и Генрихом Рорером стал лауреатом

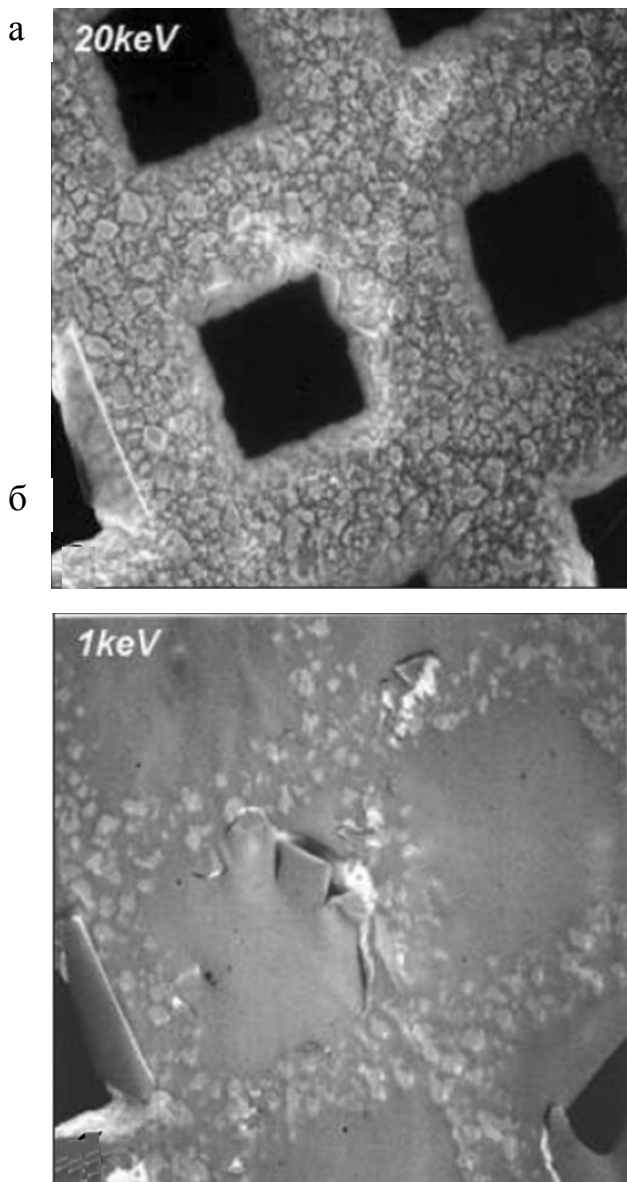


Рис. 1. Улучшение детализации ЭМ-изображения при уменьшении энергии пучка электронов. Изображения медной сетки, покрытой тонкой углеродной пленкой, полученные при энергии пучка 20 кэВ (а) и 1 кэВ (б) [2]

Нобелевской премии по физике за фундаментальную работу по электронной оптике и создание первого электронного микроскопа [15]. Интересно, что появление СТМ стимулировало работы по МЭОС, в которых стали активно использовать прецизионные пьезоэлектрические актюаторы и следящие системы, применяемые в СТМ. Настоящий обзор охватывает доступные нам работы по МЭОС и низковольтным ЭМ на их основе.

1. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЛИНЗ

1.1. Типовые схемы микроколонн на основе электростатических линз

Обычно микроколнна (МК) МЭОС (рис. 2, а) состоит из следующих частей:

- эмиттер (источник электронов, катод);
- линзы источника, включающие ограничивающую апертуру;
- дефлектор (отклоняющая система);
- объективная линза (обычно одиночная линза или система линз);
- детектор (обычно микроканальная пластина и ПЗС-матрица).

Линзы источника, называемые также микролинзами, обычно представлены в виде системы из двух или трех электродов. В первом случае — это вытягивающий электрод (экстрактор) и анод (ускоритель). Экстрактор формирует пучок с необходимой величиной тока, а анод придает пучку заданную энергию. Во втором случае, к которому относится большинство известных систем, между экстрактором и анодом помещают дополнительный фокусирующий электрод [7, 16–18].

В качестве объективной линзы в МК типа А обычно используется одиночная линза (Einzel-линза, ОЛ) или система ОЛ [19]. Einzel-линзы выбраны в качестве типовой объективной линзы в МК, т.к. они обладают хорошо настраиваемым фокусирующим эффектом как в ускоряющей (когда потенциал центрального электрода выше потенциала крайних электродов линзы), так и в замедляющей (когда потенциал центрального электрода ниже потенциала крайних электродов) модах. Кроме того, энергия выходящего из ОЛ пучка равна энергии входящего пучка. Einzel-линза окружена областью, свободной от электрического поля (field free). Обычно крайние электроды ОЛ заземлены, что позволяет избежать поляризации образца. Расстояние между выходом микролинзы и входом Einzel-линзы составляет несколько сотен микрон.

Помимо МК типа А, в литературе также обсуждается МК, в которых отсутствует объективная линза — мы будем называть их МК типа Б (рис. 2, б). Преимуществами такой структуры являются сравнительная простота юстировки и отсутствие aberrаций, создаваемых объективной линзой. Поскольку aberrации увеличиваются при отклонении пучка от оси, это ограничивает размер обзорного кадра при сканировании, особенно при малом фокусном расстоянии, характерном для электростатических линз.

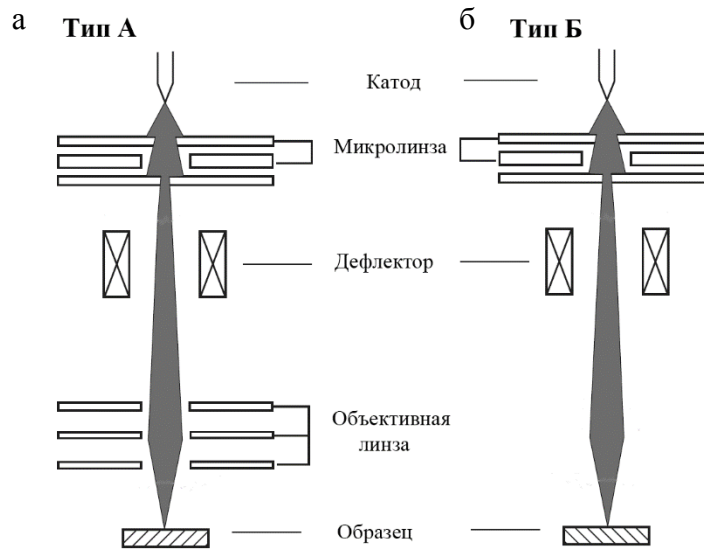


Рис. 2. Схемы микроколонн.
а — МК типа А (с объективной линзой),
б — МК типа Б (без объективной линзы)

1.2. Параметры микроколонны

Систему, состоящую из эмиттера (катода) и микролинз эмиттера, часто называют электронной пушкой. Пучок электронов в области изображения (образца) называется электронным зондом.

МК характеризуется следующими основными параметрами:

- энергия электронного зонда E_p ;
- яркость β ;
- ток электронного зонда I_p ;
- размер (диаметр) электронного зонда d_p ;
- увеличение M ;
- угол сходимости α_p (α_1).

Все перечисленные параметры МК взаимосвязаны.

В процессе разработки каждой МК стремятся получить на образце как можно более яркий пучок электронов, где яркостью называется

$$\beta = \frac{\text{ток}}{\text{площадь} \times \text{телесный угол}} = \frac{I_p}{\left(\frac{\pi d_p^2}{4}\right) \pi \alpha_p^2} = \frac{4I_p}{\pi^2 d_p^2 \alpha_p^2}, \quad (1)$$

где I_p , d_p , α_p — ток, диаметр и угол схождения пучка в области изображения соответственно. Из этого выражения видно, что для увеличения ярко-

сти следует увеличивать ток в пучке, а также уменьшать его диаметр и угол схождения.

Для характеристики источника электронов на практике применяется "уменьшенная" (нормированная) яркость β_r , т.к. ее величина сохраняется неизменной на протяжении прохождения пучка по МК [20, 21]

$$\beta_r = \frac{\beta}{V}, \quad (2)$$

где V — потенциал пучка электронов.

Ток I_p определяется углом α_0 расхождения пучка при выходе из источника:

$$I_p = \pi \alpha_0^2 \frac{dI}{d\Omega}, \quad (3)$$

где $dI/d\Omega$ — угловая плотность тока эмиссии.

Увеличение микроколоны M определяется отношением расстояний от главной плоскости линзы до объекта (P) и до изображения (Q)

$$M = \frac{P}{Q} = \frac{\alpha_0}{\alpha_p}. \quad (4)$$

Важным соотношением для расчета увеличения ЭОС является закон Гельмгольца–Лагранжа, который для малых углов может быть записан в форме:

$$\alpha_1 h_1 \sqrt{V_1} = \alpha_2 h_2 \sqrt{V_2}, \quad (5)$$

где α_i , h_i , V_i ($i = 1, 2$) — половина угла схождения (расхождения) пучка, высота объекта и потенциал в двух областях вдоль оси луча с метками 1 и 2 соответственно. Этот закон является важным принципиальным ограничением, связывая апертуру и размер предмета с апертурой и размером изображения, и показывает, что строение преобразованного пучка может быть только таким, которое допускает условие Лагранжа–Гельмгольца.

Ключевым параметром является размер пучка электронов в области изображения (размер электронного зонда) d_p , т.к. именно он влияет на латеральное разрешение МК. Оптимизация размера электронного зонда заключается в определении угла апертуры и увеличения от источника до зонда, которые обеспечивают наименьший размер зонда или наибольший ток при определенном размере зонда.

Рабочим расстоянием (PP) называется расстояние от последней апертуры до изображения. Рабочее расстояние приблизительно равно расстоянию Q ; таким образом, чем больше PP, тем больше увеличение МК.

Изображение в МК — это обычно непосредственно изображение виртуального источника, т.к. в МК обычно нет промежуточного скрещения. Виртуальным источником называют область пересечения лучей, образующихся при эмиссии, если их продолжить в сторону, обратную распространению [22].

Как и оптика света, оптика заряженных частиц страдает от aberrаций и искажений изображения. В первую очередь это касается сферических и хроматических aberrаций. В электростатических линзах сферическая aberrация возникает из-за того, что даже в достаточно узком пучке траектории электронов имеют различные углы по отношению к оптической оси. Причиной хроматических aberrаций является разная кинетическая энергия в остальном идентичных частиц, которые поэтому не сфокусированы в одной и той же точке. Таким образом, электростатическая линза из-за наличия aberrаций не может сфокусировать точечный объект в точку на плоскости изображения.

Аберрации и увеличение МК определяют размер электронного зонда, в соответствии с выражениями:

$$d_p = (d_g^2 + d_d^2 + d_s^2 + d_c^2)^{1/2}, \quad (6)$$

$$d_g = d_0 M, \quad (7)$$

$$d_s = 0.5 C_s \alpha_p^3, \quad (8)$$

$$d_d = \frac{1.5}{\alpha_p (eV)^{1/2}} = 1.22 \frac{\lambda}{\alpha_p}, \quad (9)$$

$$d_c = C_c \alpha_p \frac{\Delta(eV)}{eV}, \quad (10)$$

где d_p — диаметр электронного зонда, d_g — размер гауссова изображения, d_d — дифракционный предел, d_s — размер сферических aberrаций, d_c — размер хроматических aberrаций, α_p — угол сходимости электронного пучка в области изображения, λ — длина волны электронов, eV — энергия электронного пучка в эВ, $\Delta(eV)$ — разброс величин энергий электронов.

Способ определения d_p как среднеквадратичного значения (формула (6)), однако, подвергается критике.

Более точное выражение приведено в [23]:

$$d_p^2 = \left[\left\{ d_s^{1.3} + \left((d_d^4 + d_{c_s}^4)^{1/4} \right)^{1.3} \right\}^{1/1.3} \right]^2 + d_{c_s}^2, \quad (11)$$

где d_p — диаметр электронного зонда, содержащего 50% тока (FW50), а величины d_g , d_d , d_s , d_c — FW50-значения для изображений источника, дифракционного диска, диска сферической aberrации и диска хроматической aberrации соответственно, рассчитанные по формулам (7)–(10).

Согласно исследованиям [24, 25], размер электронного зонда можно оценить, построив графики зависимости d_d , d_s , d_c и d_g от α_p , конечного угла сходимости. Разрешение МК при использовании этого метода равно максимальному значению d_d , когда его график пересекает линии d_s , d_c или d_g (увеличенный размер источника). На рис. 3 приведен пример оценки разрешения МК [25].

При энергии 2.5 кэВ данная МК ограничена хроматическими aberrациями и при оптимальном угле сходимости, равном 4 мрад, имеет расчетное

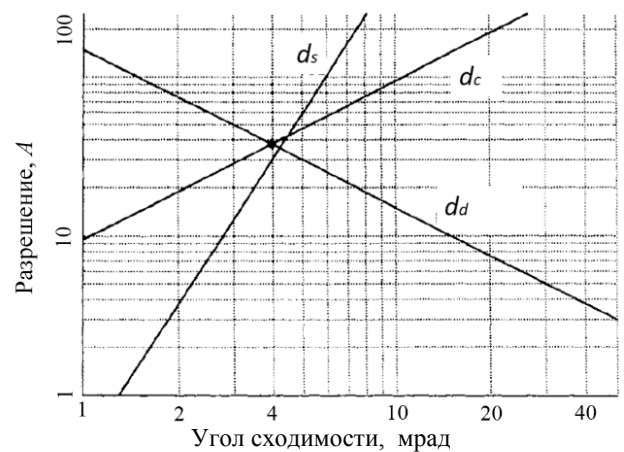


Рис. 3. Пример графического определения разрешения МК [25].

значение разрешения 3.8 нм. Согласно оценкам авторов [25], для МК с энергией менее 2.5 кэВ хроматическая абберация всегда преобладает над сферической.

Размер гауссова изображения определяется размером виртуального источника и увеличением МК. Для уменьшения d_g можно уменьшать увеличение, но это ведет к сокращению РР и увеличению α_p , что приводит к увеличению сферических аббераций. Из опыта создания МК следует, что оптимальное увеличение в системе близко к единице [17].

1.3. Принципы и методы моделирования микроколонн

Соотношения, приведенные в предыдущем параграфе, показывают, что одновременно получить маленькое ($\ll 1$) увеличение, большую яркость и минимальный размер электронного зонда невозможно. Приходится искать компромисс между параметрами МК, что приводит к необходимости моделирования.

Моделирование в той или иной степени выполняется всеми разработчиками МК для определения тока и расчета параметров ЭОС, позволяющих достичь требуемые характеристики МК.

При этом основными задачами являются:

1. Построение распределения потенциала (и электрического поля) в расчетной области.
2. Расчет электронных траекторий.
3. Оценка влияния пространственного заряда в электронном пучке на распределение электрического поля.
4. Оценка влияния упругого и неупругого взаимодействий электронов в пучке на электронные траектории.

Построение распределения потенциала

Построение электрического потенциала выполняется путем решения уравнения Лапласа для областей, свободных от пространственного заряда:

$$\nabla^2 V = 0, \quad (12)$$

где V — электрический потенциал. Хотя предположение о свободной от заряда области пространства модели не является строго верным из-за наличия самого пучка, величина тока пучка обычно такова, что выражение (12) можно считать правильным для целей проектирования линз.

При построении электрического потенциала преимущественно используется один из следующих методов: метод конечных разностей (FDM), метод конечных элементов (FEM), метод граничных элементов (BEM). Методы FDM, FEM предполагают разбиение области распространения электрического поля на элементарные ячейки

и построение электрического поля путем пространственной интерполяции значений, полученных в дискретных точках регулярной FDM-сетки или сетки, полученной методом триангуляции (FEM). Недостатком этих методов является необходимость большого количества элементов сетки для точного представления электродов нерегулярной формы и для покрытия всей расчетной области. Методы FEM, BEM реализованы в программных пакетах SIMION, MEBS, LENSYS [26, 27], COMSOL Multiphysics [28].

В основе метода BEM лежит идея, заключающаяся в расчете распределения плотности заряда, соответствующего напряжению, приложенным к электродам, и в последующем расчете распределения потенциала в пространстве, создаваемого этим распределением заряда [29]. Преимущество BEM заключается в том, что он не зависит от дискретизации пространства внутри области решения, поэтому интерполяция полевого решения между дискретными пространственными точками не требуется. Таким образом, подробная сетка при моделировании BEM необходима только на поверхности электродов, что облегчает моделирование и повышает его точность. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при моделировании электродов произвольной формы.

Расчет электронных траекторий

Для построения электронных траекторий выполняется интегрирование уравнений движения заряженных частиц под действием сил электрического поля. Траектории заряженных частиц вычисляются путем интегрирования системы уравнений Ньютона.

Электростатические силы должны быть рассчитаны на основе текущего положения и скорости частиц. Эти силы затем используются для вычисления текущего ускорения частицы, которое, в свою очередь, используется в методах численного интегрирования для прогнозирования положения и скорости частицы на следующем временном шаге. В пакете SIMION, к примеру, используется сильно модифицированный метод Рунге–Кутты четвертого порядка, являющийся популярным вычислительным методом решения дифференциальных уравнений высших порядков.

Оценка влияния пространственного заряда и взаимодействия электронов в пучке

Проблема расширения электронного пучка из-за наличия пространственного заряда (эффект Берша) возникает в областях с наибольшей плотностью тока, т.е. в кроссоверах (областях фокусировки пучка) [30]. Эффект Берша — это явление, при котором рассеяние электронов по энергии увеличивается по мере увеличения тока электро-

нов, испускаемых электронной пушкой, из-за кулоновских взаимодействий между электронами. При увеличении разброса величины энергии электронов увеличивается хроматическая абберация электронной линзы. В результате увеличивается распространение электронного луча в направлении, перпендикулярном направлению движения электронного луча, и уменьшается пространственное разрешение электронного микроскопа. В работе [26] выполнена оценка параметров, при которых наличием пространственного заряда можно пренебречь, и показано, что в МК длиной 3 мм, при угле сходимости пучка $\alpha_p = 1$ мрад, при токе 1 нА пренебречь зарядом можно, если энергия пучка больше 1 кэВ.

Оценка влияния упругого и неупругого рассеяний электронов в пучке благодаря их взаимодействию, а также взаимодействию с поверхностью образца выполняется методом статистического анализа Монте-Карло [31].

1.4. Практические аспекты моделирования микроколонн

При проектировании МК имеет смысл обратить внимание на следующее: при выполнении и расчетов, и моделирования часто удобно считать, что нулевой потенциал находится на катоде, там, где скорость электронов равна нулю, а анод имеет высокий положительный потенциал. Однако, с точки зрения практической реализации и безопасности работы с прибором, целесообразно иметь на катоде сильное отрицательное напряжение и заземленный анод. Тогда образец и крайние электроды ОЛ также будут заземлены [30].

Моделирование МК как единой системы осложнено тем, что вершина эмиттера имеет субмикронный размер (обычно радиус закругления < 100 нм), а длина МК составляет несколько мм. Обычно моделирование выполняют, разбив МК на несколько подсистем. При этом границами подсистем служат участки, свободные от электрического поля [32].

Для определения тока эмиттера моделируют полноразмерное острие. Обычно в модель включают вершину зонда с заданным радиусом закругления и электрод-экстрактор, позволяющий рассчитать электрическое поле. Показано [33], что если апертура экстрактора мала, то поле следующего электрода в колонне не проникает в область между зондом и экстрактором и не оказывает влияние на эмиссионный ток. Ток эмиссии рассчитывается в соответствии с теорией Фаулера–Нордгейма [34]. Многие исследователи указывают на хорошее соответствие теории и эксперимента [35–37].

Так как в большинстве работ расстояние от эмиттера до первой апертуры (экстрактора) ве-

лико (более 5 мкм) по сравнению с радиусом закругления зонда (обычно менее 100 нм), область на входе первой апертуры системы (экстрактора) можно считать свободной от электрического поля. Пучок электронов направляется в линзу таким образом, что траектории электронов исходят от виртуального источника, расположенного на небольшом расстоянии за физической вершиной зонда [32, 38]. Таким образом, нет необходимости включать полевой эмиссионный зонд в последовательность электродов. Вместо этого в модели принимают, что электроны возникают в области, соответствующей положению и размеру виртуального источника, и распространяются прямолинейно с заданными кинетическими энергиями и углами расхождения по направлению к линзе.

Коэффициенты сферических и хроматических аббераций C_s , C_c задаются интегральными выражениями [6], которые плохо поддаются аналитическому решению, однако легко вычисляются компьютерными методами. Программные пакеты SIMION, LENSYS вычисляют фокусные параметры линз и коэффициенты аббераций автоматически [27].

В качестве альтернативы программному определению коэффициентов абберации в [26, 39] предлагается выполнить постобработку графиков электронных траекторий и измерить минимальную толщину пучка в области фокусировки (disk of least confusion) D_{LC} (рис. 4).

Если источник электронов в модели является точечным, то при достаточной точности вычислений ширина этого диска равна величине сферических аббераций d_s . Далее, воспользовавшись формулой (8), можно определить коэффициент сферических аббераций C_s . Здесь параксиальным лучом называется луч, имеющий минимальный угол с направлением оптической оси Z , а маргинальным лучом — луч, имеющий максимальный угол по отношению к оси Z .

Степень хроматической абберации также можно оценить с помощью прямой трассировки лучей, проследив два набора лучей, исходящих от точечного источника, одинаковых по количеству и углам относительно оптической оси, но разделенных по энергии на величину ΔeV [26].

Заметим, что при сравнении размера электронного зонда, полученного при моделировании в разных работах, необходимо обращать внимание на то, каким способом была проведена его оценка. Исходя из того, что пучок имеет гауссову форму, его размер часто оценивают как ширину пика поперечного сечения пучка на его полувысоте (FWHM — Full Width at Half Maximum) [40]. В других случаях, исходя из того, что форма распределения электронов в пучке в области фокусировки может отличаться от гауссовой [39], ширину

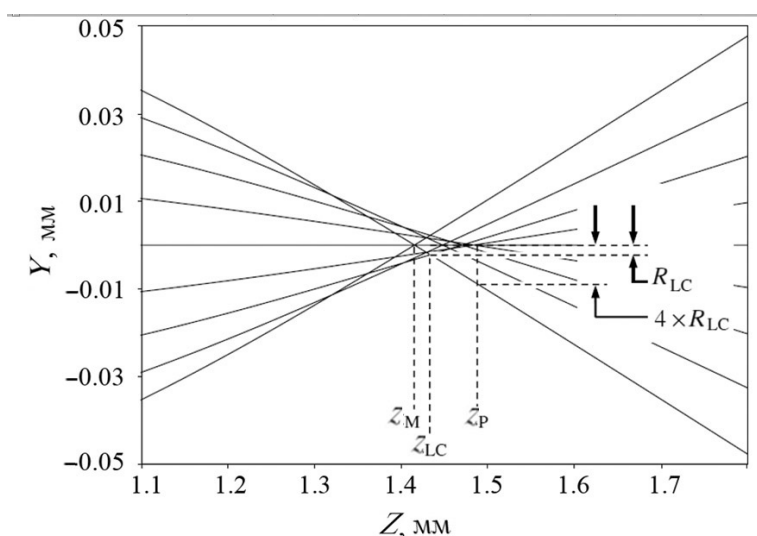


Рис. 4. Крупный план области фокусировки. Отмеченные z -позиции Z_M , Z_{LC} и Z_P относятся к изображению маргинального луча, плоскости наименьшей толщины пучка и изображению параксиального луча соответственно; R_{LC} обозначает минимальный радиус пучка

пучка оценивают как ширину сечения, через которое проходит 50% тока электронов (FW50) [17, 23].

Параметры конструкции, влияющие на разрешение МК

Основными факторами, влияющими на ширину электронного зонда, являются: апертуры линз, расстояния между линзами, фокусирующее напряжение, напряжения на одиночной линзе. Далее представлены результаты некоторых численных исследований зависимости ширины электронного зонда d_p от различных факторов.

В работе [41] показано, что увеличение апертуры ОЛ снижает d_p , а с ростом РР d_p увеличивается.

В работе [17] выполнено моделирование МК типа Б и показано, что размер d_p уменьшается с ростом ускоряющего напряжения и не сильно зависит от расстояния между эмиттером и экстрактором.

В работе [42] представлены результаты моделирования в SIMION 2-, 3-, 4- и 5-электродных линз. Получен полный набор фокальных свойств линз в зависимости от соотношения напряжений на электродах. Результат представлен в нормированном виде, что позволяет использовать расчеты для построения моделей в различных масштабах. В работе [27] продолжены расчеты, и для аналогичного набора линз представлены графики величин коэффициентов aberrаций в зависимости от соотношения напряжений на электродах линз.

В работе [39] обсуждается влияние геометрических параметров на точки фокусировки, увеличе-

ние и коэффициенты aberrаций. Проведен сравнительный анализ МК с апертурными и цилиндрическими линзами. Показано, что, хотя цилиндрические линзы, как правило, не существенно превосходят апертурные линзы, они способны работать в гораздо более широких диапазонах изменения энергии, а благодаря своей большей компактности и простоте они могут представлять собой большой интерес при практической разработке МК.

Следует отметить, что на практике размер электронного зонда часто превышает результат, полученный при моделировании, что может быть связано со следующими факторами [17]:

- упрощения, принятые при задании параметров линз при моделировании;
- неточное определение расстояния между эмиттером и экстрактором;
- наличие неучтенного объемного заряда;
- неидеальная форма отверстий электродов;
- неидеальное выравнивание элементов в колонне.

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МИКРОКОЛОНН. КОНСТРУКЦИИ МИКРОКОЛОНН, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ В ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКАХ

Этапы развития МК

Мощным фактором, стимулирующим развитие МЭОС, явились появившиеся в середине 80-х гг.

работы в области СТМ и присуждение в 1986 г. Нобелевской премии по физике Эрнсту Руске (за изобретение электронного микроскопа) и Герду Биннигу и Генриху Рореру (за изобретение сканирующего туннельного микроскопа). Разработчики МК сразу взяли на вооружение применяемые в СТМ прецизионные пьезодвигатели и принцип стабилизации электронного тока с помощью отрицательной обратной связи.

В работе [5] представлена одна из первых доведенных до реализации МК, состоящая всего из одного электрода, обеспечивающего энергию пучка 15 эВ. При таком напряжении ультраострый вольфрамовый зонд (W111), выполненный по технологии, предложенной авторами, работает в автоэмиссионном режиме, обеспечивая ток, равный 1 нА. Сканирование образца выполняется при помощи пьезосканера СТМ несфокусированным пучком электронов. Латеральное разрешение порядка 3 нм обеспечивается за счет малого расстояния до образца (схема Б). Технологии СТМ в той или иной степени были использованы и другими авторами ([9, 43]).

Наиболее распространенной моделью является МК с объективной линзой (МК типа А), представленная на рис. 2, а. Для известных разработок МК этого типа работа [8] является базовой. В этой работе представлена МК с энергией электронов 1 кэВ и объективной линзой в виде симметричной ОЛ. Линзы источника электронов состоят из экстрактора, фокусирующего электрода и анода с размерами апертур 5, 100 и 2.5 мкм соответственно. Радиус закругления зонда составляет 0.1 мкм, расстояние от зонда до экстрактора 50–100 мкм. Диаметр отверстия объектива (ОЛ) составляет 200 мкм, а расстояние между объективами — 250 мкм. Объектив, работающий на рабочем расстоянии 1 мм в режиме ускорения, имеет, согласно проведенному расчету, коэффициенты хроматической и сферической аберраций, составляющие приблизительно 2 и 50 мм соответственно. Показано, что размер зонда 9.9 нм может быть достигнут при оптимальном полуугле сходимости, равном 6.3 мрад. Ток зонда составляет 1 нА. Были протестированы миниатюрный эмиттер Шоттки и холодный автоэмиссионный катод в виде W(111) иглы, обработанный кислородом. В работе представлено изображение алюминиевой решетки, полученное в режиме сканирующего просвечивающего электронного микроскопа с использованием эмиттера Шоттки при $T = 1800$ К и уровне вакуума 5×10^{-11} – 1×10^{-10} Торр. Площадь изображения порядка 15×15 мкм, при увеличении на нем различимы детали размером 10 нм.

Сборка микролинз и линзы объектива выполнялась путем анодного связывания слоев из кремния и термостойких прокладок. Оптическая юсти-

ровка линз в колонне выполнена с точностью 1 мкм.

Самая малоразмерная МК типа А представлена в работе [43], где предложен дизайн МК, состоящей из зонда, анода и одиночной линзы. МК состоит из металлических электродов с апертурами размером 0.3–1.5 мкм, "просверленными" при помощи сфокусированного ионного пучка, разделенных изолирующим материалом. Вследствие своего миниатюрного размера эта колонна обладает минимальными аберрациями. Рабочее расстояние в такой системе составляет 5 микрон. Ускоряющее напряжение 300–500 В. Расстояние от эмиттера до анода — 500 нм. Для того, чтобы выполнять сканирование, авторы предлагают использовать пьезодвигатели СТМ. Авторы декларируют, что при помощи разработанной ими миниатюрной конструкции можно получать изображения одиночной молекулы белка и ДНК, однако экспериментальных результатов не предоставляют.

Интересная концепция МК MEMS-типа с энергией от 2 до 15 кэВ, интегрированной на одном кристалле, предложена в работе [44]. МК представляет из себя многослойную структуру из кремния и стекла, содержащую электронную пушку, одиночную линзу и анод в виде кремниевого чипа с тонкой мембраной. МК жестко соединена с вакуумным микронасосом и микрокамерой для образцов. Электронная пушка состоит из автоэмиссионного катода на основе углеродных нанотрубок (УНТ). Все электроды были разделены и отрегулированы с помощью специального полимерного держателя, который был изготовлен методом 3D-печати. Была получена электронная полевая эмиссия и проведены первые измерения фокусирующих возможностей ОЛ, изготовленной на кремниевой подложке. При расстоянии катод-затвор 1.1 мм пороговое напряжение электронной эмиссии составляло около 1100 В. Размер электронного зонда составил 0.163×0.163 мм. Характерной особенностью описываемой разработки являются линзы с прямоугольной апертурой [45]. Прямоугольная форма апертуры электростатических линз была проанализирована ранее в работе [46], где посредством моделирования были показаны преимущества прямоугольной формы в сравнении с конвенциональной круглой.

В работе [47] разработанная авторами МК дополнена отклоняющей системой, и приведены полученные электронно-микроскопические изображения (рис. 5).

Наличие объективной линзы в конструкции МК является существенным ограничением для увеличения площади сканирования. Из-за малого фокусного расстояния, присущего всем МЭОС, увеличение площади требует больших углов отклонения

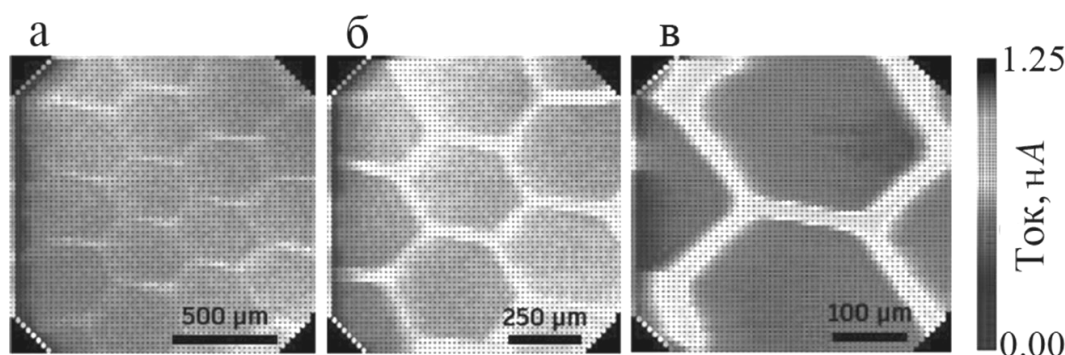


Рис. 5. Область сканирования разработанной МК с отклоняющей системой в зависимости от энергии электронного пучка [47].
а — 2 кВ, б — 3 кВ, в — 5 кВ; рабочее расстояние равно 5 мм; диаметр электронного пучка составляет 5 мкм

электронного пучка от оптической оси МК, что, в свою очередь, приводит к большим aberrациям и искажениям на краях обзорных изображений. Для решения этой проблемы в работах [48–50] было предложено перемещать оптическую ось МК синхронно с отклоняющимся электронным пучком, т.е. одновременно с пучком отклонять и ОЛ. Вследствие малых размера и веса объективной линзы в МЭОС осуществление такого прецизионного механического сканирования не представляет особой проблемы, в отличие от сканирования объективной линзой в электронной колонне стандартного микроскопа с большими размерами и весом.

Похожий подход продемонстрирован и в работе [51], где путем моделирования показано, что использование ОЛ, апертуры которых отслеживают положение центра электронного пучка путем их смещения перпендикулярно оптической оси системы, позволяет уменьшить aberrации. Альтернативным решением может быть использование ОЛ с эллиптическими апертурами [51].

Однако, несмотря на то что описанные усовершенствования в принципе позволяют существенно уменьшить aberrации в МК, они все-таки несколько усложняют их практическую реализацию. Поэтому многие разработчики пошли по пути упрощения конструкции и разрабатывали МК без объективной линзы. О таких разработках рассказано ниже.

Конструкции МК типа Б

Поскольку МК типа А содержат ОЛ, то их изготовление осложняется необходимостью совмещения и юстировки вдоль одной оптической оси электронной пушки, отклоняющей системы объективной линзы. Очевидно, что МК типа Б, где ОЛ вообще отсутствует, представляет собой более

простую техническую задачу. МК с самых первых разработок предназначались как для СЭМ, так и для электронной литографии, в том числе многопучковой. Основным препятствием для выполнения сканирования или литографии по большой площади при помощи МК типа А является ограничение, накладываемое апертурой объективной линзы. С целью преодоления этого ограничения были предложены МК без объективной линзы (МК типа Б).

Удачным примером такой разработки является МК (рис. 6), предложенная в работах [13, 14], где извлечение, ускорение и фокусировка электронного пучка выполняются при помощи всего лишь 2 микролинз, созданных на основе кремниевых пластин. Источником электронов является W-игла, к которой приложено отрицательное смещение

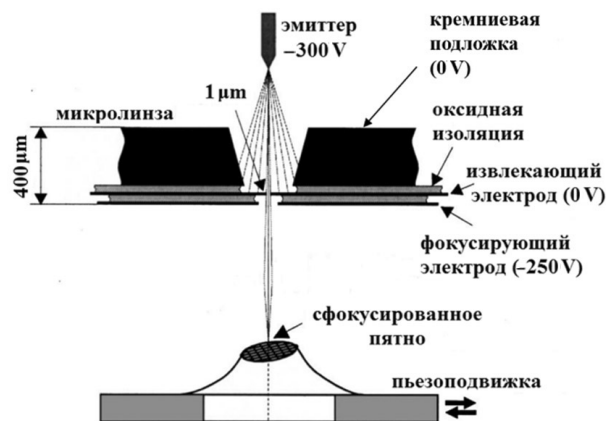


Рис. 6. Схема МК, состоящей из эмиттера и микролинзы [14].

300 В, находящаяся на расстоянии 1–2 мм от первого электрода-инжектора с апертурой диаметром 1 мкм. Эмиссионный ток составляет ~ 1 мкА. В статье, правда, ничего не сказано о размерах, структуре и величине работы выхода зонда. На второй электрод, называемый фокусирующим, прикладывается отрицательное напряжение от 150 до 250 В, изменяя которое можно корректировать размер фокусного пятна. При оптимальном фокусирующем напряжении 175 В и рабочем расстоянии 1.3 мм пространственное разрешение составляет 30 нм. Расположение источника электронов на большом расстоянии от электродов избавляет от необходимости прецизионного совмещения положения зонда и центра апертуры инжектора, что является важным преимуществом такой МК. Данная концепция МК может быть распространена на устройства микроэлектронной литографии в субмикронном разрешении, что продемонстрировано экспериментально. С использованием представленной МЭОС выполнена электронная литография низкоэнергетичным пучком 310 эВ, и на площади (6×6) мкм² создана периодическая структура из параллельных линий с шириной линии ~ 200 нм [14].

В работе [18] представлены 2 типа МК: с объективной линзой и без нее (МК типа А и Б, показаны на рис. 7 слева и справа соответственно), и продемонстрирована их работа (рис. 8) при сканировании образцов по большой площади.

С помощью МК типа Б (рис. 8, а) без объективных линз было достигнуто поле сканирования 40 на 40 мм, на котором четко различимы линии толщиной 20 мкм. Было показано, что предельная площадь сканирования пропорциональна рабоче-

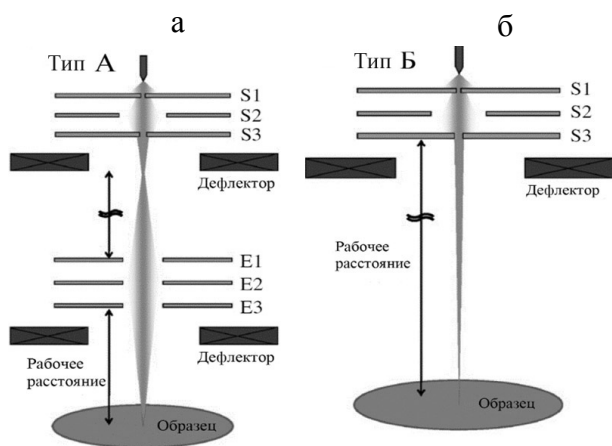


Рис. 7. Конструкция микроколонны, разработанная для обеспечения большого поля зрения [18]. а — МК типа А с объективной Einzel-линзой, оснащенная разделенной отклоняющей системой; б — МК типа Б без объективной линзы

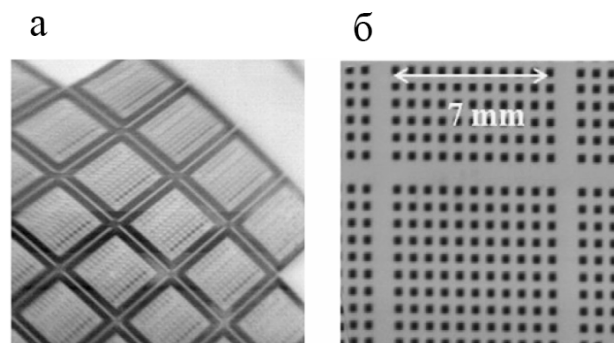


Рис. 8. Изображения тестовых объектов, полученные в работе [18].

а — изображение максимальной площади 40×40 мм, полученное при помощи МК без объективных линз (МК типа Б) при энергии электронного пучка 150 эВ и рабочем расстоянии 100 мм; б — фрагмент 15×15 мм, взятый из обзорного изображения площадью 168×168 мм, полученного при помощи МК типа А с объективной линзой и распределенной отклоняющей системой при энергии электронного пучка 300 эВ и рабочем расстоянии 195 мм

му расстоянию и обратно пропорциональна энергии электронного пучка. В работе показано (рис. 8, б), что в МК типа А, но с разделенной на две части отклоняющей системой, можно получить очень большое поле обзора (170 мм на 170 мм), если объектив-источник и ОЛ правильно юстированы. Авторы считают, что любая из схем, представленных на рис. 7, может быть использована при разработке инспекционного оборудования с большим обзором на основе низкоэнергетических МК.

В продолжение работ по совершенствованию конструкции МК авторами было предложено дополнить традиционную систему линз источника фокусирующей линзой [33]. Набор линз источника в предложенной модели состоит из четырех электродов: экстрактор S1, фокусирующий электрод S2F, ускоритель S2 и электрод с ограничивающей апертурой S3 (рис. 9, а). Диаметры апертур трех электродов составляют 50 мкм, за исключением ограничивающей апертуры, диаметр которой равен 2.5 мкм. К катоду и фокусирующему электроду приложено отрицательное напряжение 1000 В и 700 В соответственно, а электроды S2 и S3 заземлены. Расстояние от катода до экстрактора составляет 50 мкм. В работе [52] авторы показали при помощи моделирования, что при использовании предложенной системы линз источника в МК типа Б можно получить размер пучка на выходе из отклоняющей системы не более 5 нм при энергии 1 кэВ и рабочем расстоянии от выхода дефлектора до образца, равном 1 мм.

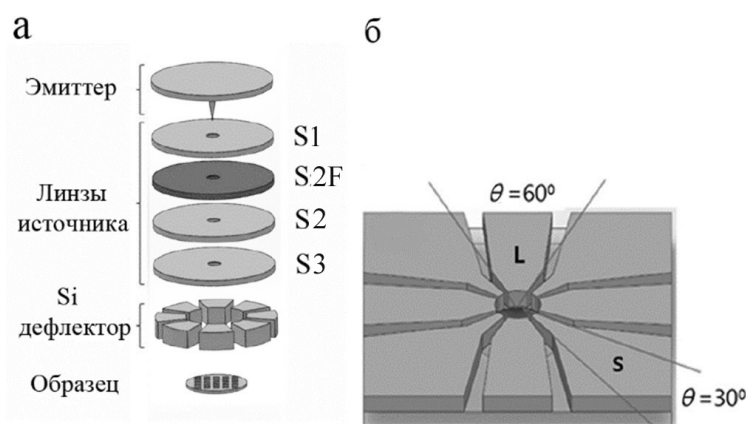


Рис. 9. Усовершенствованная конструкция МК [33]. а — микроколнна без одиночных линз с усовершенствованной системой линз источника (микролинзой) и с кремниевым дефлектором; б — схема модифицированного кремниевого дефлектора

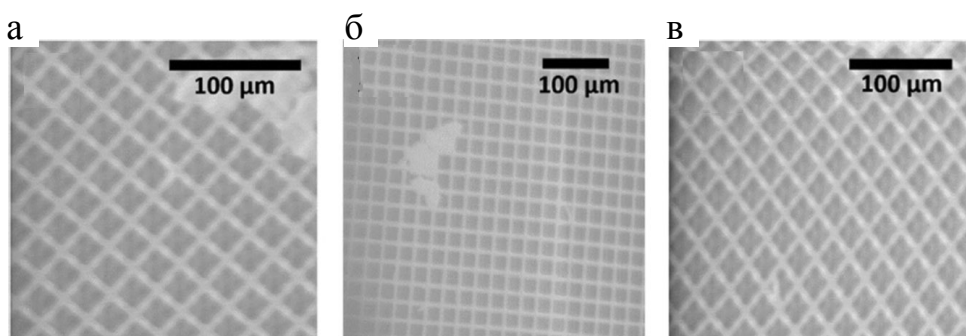


Рис. 10. Образцы изображений ячеек медной сетки, полученных с помощью МК с использованием модифицированных дефлекторов Si и стандартных дефлекторов с одинаковым отклоняющим напряжением 100 В [53]. Напряжение на эмиттере зафиксировано на уровне 400 В. Отклоняющее напряжение подается: а — на меньшие (30°) электроды, б — на большие (60°) электроды дефлектора Si, в — на четыре электрода стандартного дефлектора

На основании этих расчетов была создана и апробирована МК типа Б [53], особенностью которой является одинаковый диаметр апертуры у линз S1, S2, S2F (50 мкм), что облегчает изготовление и юстировку. Ограничивающая апертура S3 заземлена и имеет размер 2.5 мкм. В работе [53] предложен оригинальный Si-дефлектор (рис. 9, б) и исследовано влияние размера электродов дефлектора на площадь сканирования и размер электронного зонда. Путем моделирования в коммерческой программе Орега 3D получено, что при использовании широких (60°) электродов дефлектора площадь сканирования увеличивается почти вдвое, при этом, наблюдается некоторое ухудшение разрешения, которое, однако, даже при площади 150 мкм^2 не превышает 18 нм. Эксперимен-

тально было показано, что предложенный Si-дефлектор при использовании широких электродов позволяет сканировать по площади большей, чем при использовании стандартного дефлектора, при одинаковом отклоняющем напряжении (рис. 10).

Расчеты, приведенные в [40], показывают, что в МК типа Б, имеющей источник с тремя электродами, пучок с энергией не более 1 кэВ может быть сфокусирован в пятно с размером не более 15 нм при рабочем расстоянии около 50 мкм.

Коррекция аберраций в МК

Традиционно все разработчики МК стараются уменьшить размер электронного зонда путем оптимизации конструкции и напряжений на электро-

дах. Применение корректоров aberrаций в МК затруднено из-за сложности их миниатюризации. Принцип, на котором основано действие корректора aberrаций, заключается в создании вогнутой линзы, которая рассеивает внеосевые лучи таким образом, что они повторно сходятся в точку, а не в диск в плоскости гауссова изображения [54].

В работах [55, 56] в качестве корректора одновременно сферических и хроматических aberrаций МК было предложено использовать тонкую металлическую пленку, зажатую между двумя электродами. Путем моделирования показано, что, если электроны проходят через пленку с близкой к нулю энергией и пленка имеет достаточную прозрачность для электронов, то коэффициенты сферических aberrаций на небольшом расстоянии от пленки отрицательны (рис. 11). Кроме того, пленка в такой системе служит монохроматором, т.к. не пропускает электроны, имеющие энергию меньшую, чем величина работы выхода пленки. Результаты расчетов, приведенные в [56, 57], показывают, что ширина электронного зонда в МК с энергией электронов 1 кэВ при использовании корректора aberrаций в виде тонкой (20 нм) золотой пленки может составлять всего 2 нм, рабочее расстояние при этом равно 15 мкм, а длина всей МК — 215 мкм. Авторы считают, что такая коррекция aberrаций может быть использована при создании многолучевых МЭОС для диагностики полупроводниковых структур.

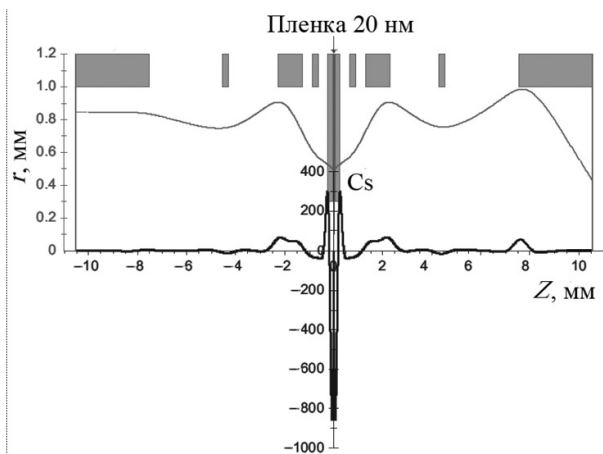


Рис. 11. Величина коэффициента сферических aberrаций C_s , вычисленная при помощи интегрирования как функция z .

В верхней части показана схема колонны и параксиальный луч, начинающийся от положения объекта [57]

3. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МК

Успех построения МК во многом связан с качеством источника электронов.

Из-за малых геометрических размеров МК в ней обычно нет промежуточного кроссовера, и изображение, определяющее диск электронного зонда, является непосредственно изображением виртуального источника. Опять же, из-за малых размеров коэффициент увеличения в МК обычно порядка единицы. Таким образом, размер виртуального источника вносит существенный вклад в разрешение МК.

Другим существенным фактором, влияющим на качество низковольтных МК, является величина разброса энергий электронов, т.к. хроматические aberrации пропорциональны соотношению $\Delta(eV) / (eV)$, где $\Delta(eV)$ — разброс величин кинетических энергий, а eV — энергия пучка электронов. Чем меньше энергия пучка в МК, тем больший вклад в величину хроматической aberrации вносит $\Delta(eV)$.

Как уже упоминалось, для характеристики источника электронов обычно используется "уменьшенная" (нормированная) яркость β_r , величина которой при отсутствии взаимодействия электронов остается неизменной при прохождении пучка в колонне и служит характеристикой величины тока в электронном зонде [20]. Нормированная яркость β_r является единственным по-настоящему инвариантным свойством источника электронного излучения. Она не зависит от свойств фокусировки или aberrаций МК, однако ее значение уменьшается из-за эффекта Берша.

Важным фактором, характеризующим источник, является пространственная когерентность, которая пропорциональна размеру источника. В идеале все электроны должны вылетать из одной точки. Однако в реальности чем меньше размер источника, тем меньше его стабильность [58].

Таким образом, основными характеристиками, определяющими качество источника электронов, являются:

- виртуальный размер;
- яркость, "уменьшенная" (нормированная) яркость;
- величина разброса по энергиям;
- пространственная когерентность.

В МК используются различные типы источников:

- холодные автоэмиссионные [5, 8, 59];
- катоды Шоттки [8];
- катоды на основе углеродных нанотрубок (УНТ) [53, 60, 61];
- графеновые катоды [62];
- туннельные (МДМ) [63];
- лазерные фотоэмиссионные [40].

В качестве автоэмиссионного катода, как правило, используют W-иглы, заостряемые с помощью электрохимического травления поликристаллической W-проволоки. Известно, что на вершине острой иглы, изготовленной из поликристаллической проволоки, как правило, локализовано кристаллическое зерно с кристаллографическим направлением $\langle 100 \rangle$, ориентированным вдоль оси проволоки. Поэтому на вершине такой иглы, как правило, имеется плоский нанометровый участок, ориентированный перпендикулярно к ее оси. Однако, если изготавливать иглу из кристаллической заготовки, длинная ось которой совпадает с кристаллографическим направлением $\langle 111 \rangle$, то ее вершина будет заканчиваться острым трехгранным углом, что приближает такой эмиттер к идеальному точечному источнику. Радиус закругления острия для получения автоэмиссионного тока в МК должен быть менее 100 нм. В работе [5] предложен холодный полевой источник, использующий вольфрамовый зонд (W111), сформированный таким образом, что эмиссия происходит из группы нескольких атомов на вершине иглы. Электроны, туннелирующие сквозь треугольный потенциальный барьер в случае холодных полевых катодов, имеют малый энергетический разброс $\Delta E \sim 0.5$ эВ, что особенно важно для низковольтных систем, к которым как раз относится МК, из-за зависимости величины хроматических aberrаций от ΔE .

Автоэмиссионный катод обладает очень привлекательными характеристиками: малый размер, высокая яркость, малый разброс энергии электронов. Однако, чем меньше радиус зонда, тем менее стабильным в общем случае является ток автоэмиссии, зависящий от чистоты поверхности катода и уровня вакуума. Низкая стабильность автоэмиссионного тока и повышенные требования к вакууму ($p < 10^{-9}$ Торр) ограничивают применение холодных автокатодов в МЭОС для электронной микроскопии и литографии.

Катод Шоттки — это термоавтоэмиссионный катод, также представляющий собой иглу, изготовленную из W-проволоки или кристаллической заготовки с длинной осью, совпадающей с кристаллографическим направлением $\langle 100 \rangle$. На вершинах таких игл имеется площадка размером $\sim 10 \times 10$ нм, которую покрывают пленкой ZrO. Это снижает работу выхода поверхности, и при нагреве до 1800–1900 °C такой катод работает в режиме термоавтоэлектронной эмиссии [38]. Несмотря на то, что холодный полевой эмиттер по размеру источника и разбросу энергии электронов лучше катода Шоттки, на практике чаще всего используется термо-эмиссионный катод Шоттки, благодаря его более высокой устойчивости и стабильности.

Перспективным решением проблем автоэмиссионных катодов может стать никелевый точечный катод с графеновым покрытием [62]. Этот источник также является холодным автоэмиссионным катодом. Эксперименты показывают, что он обеспечивает стабильную электронную эмиссию при относительно больших размерах острия, может работать при давлении $p > 10^{-8}$ Торр и имеет сверхнизкое значение работы выхода 1.10 ± 0.07 эВ. Такой катод имеет расчетное значение нормированной "уменьшенной" яркости 1.46×10^9 Ам⁻²ср⁻¹В⁻¹ при радиусе острия 170 нм, а измеренный разброс энергии составляет от 0.246 до 0.420 эВ для диапазона радиусов острия от 260 нм до 500 нм, что сопоставимо со стандартными характеристиками холодных автоэмиссионных катодов.

Также достаточно активно развивается направление, в котором в качестве электронных эмиттеров для МК используются углеродные нанотрубки (УНТ). Авторы работы [61] сравнили стандартный автоэмиссионный W-катод с 2D распределенным катодом на основе УНТ при их работе в МК с одинаковой конструкцией с диаметром апертур 100 мкм. Было установлено, что при энергии электронного пучка менее 600 эВ ток эмиттера с УНТ на три порядка превышал ток W-зонда и составлял около 100 мА. Авторы отмечают также, что, благодаря протяженному размеру катода на основе УНТ, юстировка такого источника относительно апертур МК гораздо проще, чем при использовании стандартного W-эмиттера. В работе [53] показаны изображения, полученные при помощи МК с 2D распределенным катодом на основе УНТ.

В работе [64] в качестве источника электронов использовалась W-игла с радиусом ~ 100 нм, приближенная до расстояния Z к плоскому инжектору с круглой апертурой и одиночной электростатической микролинзой. Моделировался режим автоэлектронной эмиссии через треугольный потенциальный барьер с учетом сил изображения при напряжении V от 10 до 120 В. Необходимая для автоэмиссии напряженность электрического поля достигалась за счет прецизионного сближения W-иглы с плоским инжектором до расстояний от 10 до 500 нм. Для сближения и стабилизации эмиссионного тока использовалась методика СТМ. Экспериментально без предварительного прогрева W-иглы получен стабильный ток $I = 0.5 \times 10^{-9}$ А и измерены зависимости $Z(V)$, совпадающие с расчетными данными при условии, что работа выхода ~ 1.2 эВ.

В работе [63] предложена оригинальная концепция источника электронов на основе туннельного контакта "металл–диэлектрик–металл" с использованием вольфрамового зонда, покрытого слоем оксида вольфрама, и тонкой (~ 20 нм) золотой пленки (рис. 12, а).

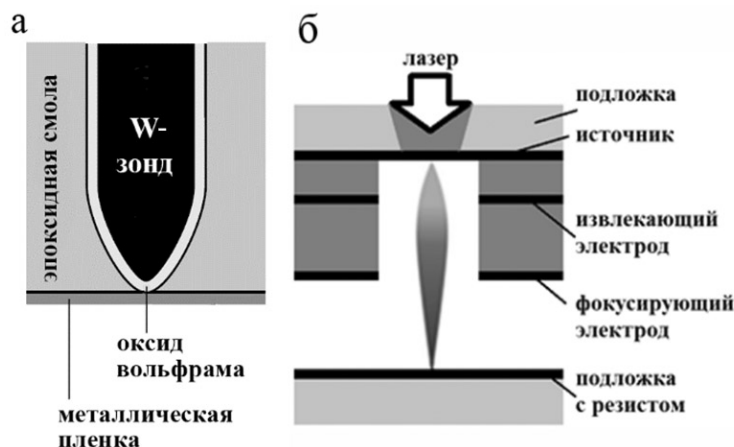


Рис.12. Схема источника электронов на основе туннельного контакта "металл–диэлектрик–металл" [63] (а) и схема лазерного фотоэмиссионного катода[40] (б).

Достоинством этого источника является достаточно простой способ изготовления, низкое напряжение эмиссии (единицы вольт), отсутствие особых требований к вакууму. Предполагается, что такой источник имеет высокую яркость, а пучок туннелирующих электронов обладает высокой монохроматичностью, обусловленной необходимостью преодоления энергетического барьера, равного работе выхода золотой пленки. Экспериментально полученный ток эмиссии составляет десятки пА. Существенной проблемой, однако, является низкая стабильность эмиссионного тока.

Наконец, в работе [40] обсуждается применение в МК лазерных фотоэмиссионных катодов, которые могут иметь характеристики, сходные с полевыми катодами: размер 10×10 нм, разброс энергий $\Delta E \sim (0.1-0.2)$ эВ. Как отмечают авторы, достоинством фотоэмиссионных катодов является высокая яркость излучения, низкое рассеивание энергии, низкое напряжение эмиссии и простота оптического управления без использования экранирующих пучков. Эти особенности позволяют значительно упростить конструкцию микроколонн и повысить их компактность.

4. ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОКОЛОНН

При изготовлении МК используются самые разнообразные технологии, включая: точную механообработку, групповую кремниевую технологию микроэлектроники, технологию фокусированных электронных и ионных пучков, оптическую и электронную литографии. Конечно, под-

робное обсуждение всех технологических нюансов изготовления МЭОС требует отдельного специального обзора, поэтому здесь мы лишь кратко представим некоторые работы.

В работе [44] обсуждается технология создания многослойных структур из кремния и стекла на основе точной механообработки и оптической юстировки.

В работе [11] при изготовлении МК применялась лазерная микрообработка. При помощи лазера были просверлены отверстия с диаметром около 20 мкм сразу в 5 слоях металла и кремния. Измеренное суммарное смещение центров отверстий не превышало 1 мкм. Изображения апертур, изготовленных лазерным сверлением, показывают, что на их краях образуются шероховатости металла, которые приводят к неравномерному распределению электрического поля. Чем меньше размер апертур МК, тем сложнее технология сборки и юстировки элементов вдоль оптической оси МК. Неточное совмещение центров апертур приводит к резкому росту геометрических aberrаций, что показано путем моделирования [11, 40].

Наиболее перспективным с точки зрения высшей, субмикронной, точности выравнивания отверстий в электродах является метод, основанный на фрезеровании отверстия линзы ионным пучком через сэндвич, состоящий из нескольких проводящих слоев, разделенных тонкими изоляторами [65] (рис. 13). Однако и он не лишен недостатков. Применение данного метода сопряжено с образованием конической структуры отверстий [66], где угол наклона стенок сильно зависит от толщины фрезеруемого слоя. Кроме того, этот

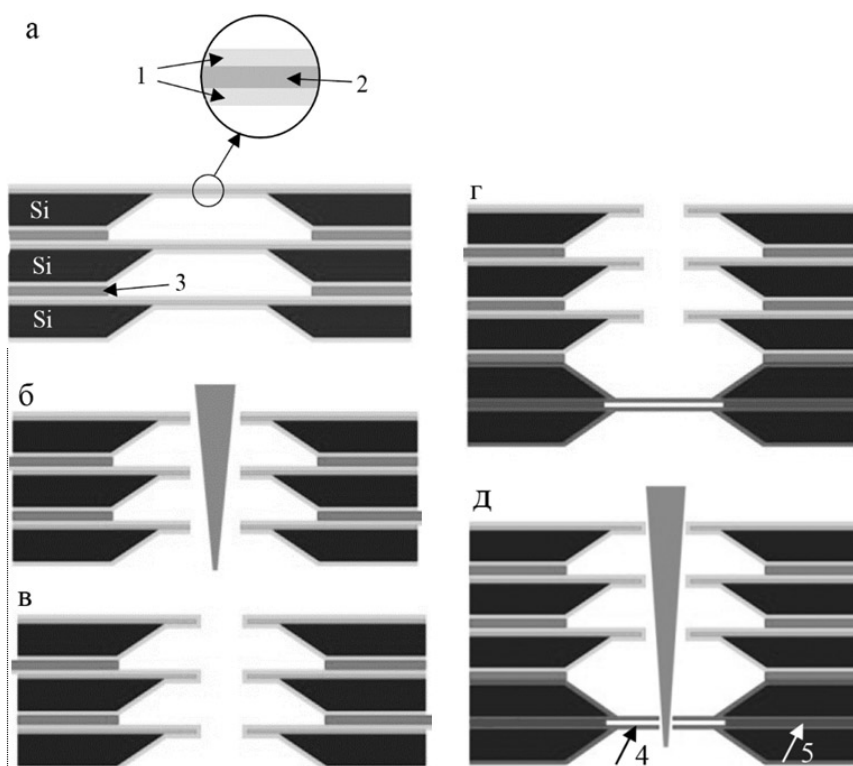


Рис. 13. Процедура изготовления микроколонн.

Обозначения материалов: 1 — золото, 2 — полиамидная пленка, 3 — нитрид кремния, 4 — палладий, 5 — оксид алюминия;

а — три кремниевых чипа укладываются друг на друга для изготовления Einzel-линзы; б — отверстия Einzel-линзы фрезеруются с использованием сфокусированного пучка ионов галлия; в — отверстия покрываются напылением золота, чтобы покрыть нитрид кремния, выявленный во время фрезерования; г — стопка микролинз прикрепляется к Einzel-линзе; д — апертуры микролинз фрезеруются через отверстия Einzel-линзы

метод ограничен толщиной электродов и непроводящих прокладок на уровне нескольких микрометров. Также созданные таким методом линзы часто подвержены эффектам зарядки. Во избежание зарядки отверстие в прокладке должно быть намного больше, чем отверстия в электродах.

В большинстве МК основой для их создания являются Si-пластины и технология их обработки, развитая в микроэлектронике. В работах [9–11, 13, 14, 17, 36, 37, 65–73] описаны МК, изготовленные с использованием технологий обработки кремниевых пластин. В [25, 70] описана технология создания МК, состоящих из многослойных сэндвичей в виде кремниевых пластин, тонких диэлектрических и проводящих слоев, требующих прецизион-

ного совмещения апертур в линзах источника, дефлектора и в ОЛ, использующая групповые методы микроэлектроники.

Важным этапом изготовления МК является прецизионная механическая юстировка отдельных элементов. Одним из способов выполнить оптическую юстировку служит описанный в [35, 71] анализ картины лазерной дифракции.

Оригинальным примером миниатюрной ЭОС является прибор электронной голографии [72], к созданию которого привели разработки, начатые в работе [5]. В установке электронной голографии (рис. 14) имеется точечный источник

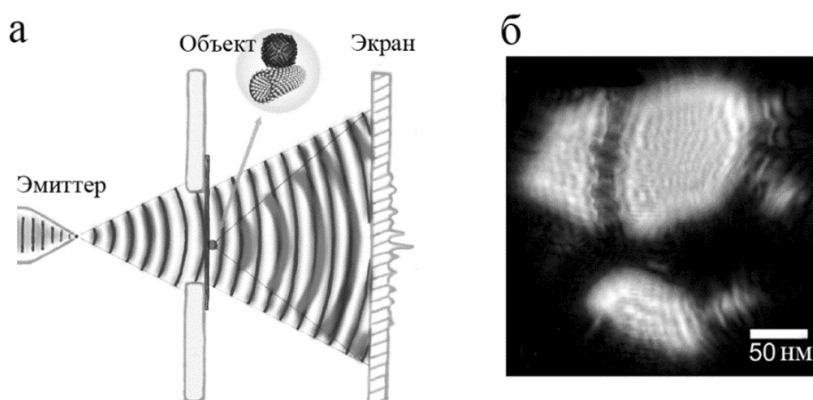


Рис. 14. Принцип работы установки электронной голографии (а) и восстановленное изображение электронной голограммы с кинетической энергией 53 эВ, состоящее из нескольких молекул ферритина, прикрепленных к пучку углеродных нанотрубок (б) [72].

электронов W(111) и лишь один электрод-экстрактор. На расстоянии менее 1 микрона от плоскости, в которой помещен объект, часть когерентной электронной волны рассеивается ферритином, прикрепленным к углеродной нанотрубке (вставке), образующей волну, исходящую от объекта. На экране детектора, расположенного на расстоянии 68 мм, регистрируется интерференционная картина дальнего поля между объектом и опорной волной — голограмма, на основании которой выполняется численная реконструкция белка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Низковольтные миниатюризованные электронно-оптические системы, которые также называют микроколоннами, представляют собой самостоятельное направление в области электронной оптики и являются основой низковольтных миниатюрных электронных микроскопов, многоколonoчных литографов и систем электронной голографии.

Это направление появилось в 80-х гг. XX в. в связи с формированием доступной технологической базы для создания и сборки миниатюрных электронных линз; оно также было стимулировано появлением сканирующей зондовой микроскопии с ее системами прецизионного перемещения на основе пьезоактюаторов и следящими системами для стабилизации тока. Интерес к низковольтным МЭОС связан с фундаментальным принципом уменьшения aberrаций при одновременном уменьшении размеров и напряжений в электронно-оптических системах, неразрушающим воздействием на образец, повышенным контрастом изображения, обусловленным проникновением элек-

тронов низких энергий лишь в поверхностные слои образца, и возможностью исследования плохо проводящих образцов без дополнительного нанесения проводящих покрытий. Особые надежды связывают с многоколonoчными системами на чипе для высокопроизводительной многолучевой литографии, а также системами для инспекции больших пластин. Существование и доступность разнообразных программных пакетов для электронно-оптических расчетов и развитие групповых технологий микроэлектроники, технологий фокусированных электронных и ионных пучков, лазерных технологий и технологий прецизионной 3D-печати позволяют моделировать и создавать МЭОС практически любых конфигураций с апертурами любых размеров, вплоть до субмикронных. При создании МК найдены оригинальные решения, например, для корректора aberrаций и монохроматора на основе металлической пленки нанометровой толщины, или для источника электронов на основе локального туннельного контакта "металл–диэлектрик–металл". Основным недостатком МЭОС является малое фокусное расстояние, являющееся причиной малого размера обзорного кадра. Это связано с увеличением aberrации при отклонении пучка от оптической оси, что накладывает ограничение на угол отклонения и, как следствие, приводит к уменьшению площади обзорного кадра. Но эту проблему можно решить путем синхронного отклонения оптической оси одновременно с отклонением электронного пучка. Учитывая малые размеры и малый вес МЭОС, это не сложно реализовать на практике, в отличие от больших и тяжелых электронно-оптических систем, например, с помощью пьезоэлектрических

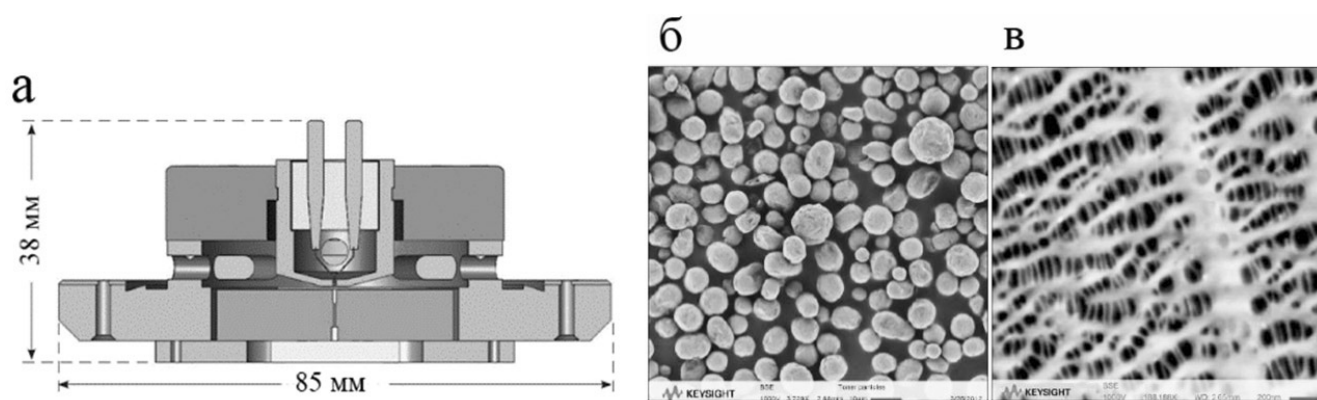


Рис. 15. Электронный микроскоп 8500 FE-SEM.

а — изображение разреза колонны 8500 FE-SEM; б — частицы тонера (смесь углерода и полимера), получено без нанесения проводящего покрытия; в — мембрана-сепаратор литий-ионного аккумулятора Celgard 2325, получено без нанесения проводящего покрытия (https://www.unitest.com/meas_eq/agilent/8500_fesem.html)

двигателей. Учитывая более низкую себестоимость МК по сравнению с большими электронно-оптическими системами и все перечисленные выше достоинства МЭОС, а также возможность значительного увеличения производительности электронной литографии в случае применения многоколоночных систем, казалось бы, после стольких лет результативных исследований следовало ожидать появления промышленных партий приборов на основе МЭОС. Однако это далеко от реальности. Нам известны лишь два прибора на основе электростатических МК, выведенные на рынок электронных микроскопов, — 8500 FE-SEM и Voxa's МОСНП. Микроскоп 8500 FE-SEM (рис. 15, а) создан крупной компанией Agilent на основе работ Chang, Kretchmer, Muray [4, 68, 69]. Прибор оснащен нагреваемым полевым катодом Шоттки, а его МК изготовлена с использованием кремниевых технологий. Прибор работает в диапазоне напряжений от 500 В до 2 кВ и имеет пространственное разрешение менее 10 нм при напряжении 1 кВ. Компания Agilent остановила производство микроскопа 8500 FE-SEM, но мы считаем полезным привести ниже его подробные характеристики (см. Приложение).

На рис. 15, б, в, показаны примеры изображений, полученных при помощи 8500 FE-SEM.

Микроскоп Voxa's МОСНП разработан в рамках проекта NASA на основе МК, предложенной в работе [12]. Он изначально адаптирован к исследованиям на поверхности Луны и других планет в космосе [37, 58, 74–76]. Прибор можно переносить в руке (высота 0,25 м, вес менее 12 кг), он имеет низкое энергопотребление (менее 80 Вт), удобный встроенный интерфейс беспроводной планшета и многопользовательские возможности

дистанционного управления. Этот микроскоп оснащен встроенным испарителем металлов для подготовки образцов на месте и энерго-дисперсионным рентгеновским спектрометром, и по понятным причинам в нем отсутствует система откачки воздуха. Изучение геологических и других природных материалов с использованием МОСНП выполняется таким образом, чтобы образцы оставались неповрежденными. Следовательно, образец может быть проанализирован многократно, что позволит составить более полную картину происхождения образца и его возможной эволюции (рис. 16, а).

Хотя микроскоп Voxa's МОСНП прошел испытания в космосе (рис. 16, б), по-видимому, пока это опытный образец.

Мы считаем, что в случае с МЭОС действует эффект заколдованного круга. Действительно, для промышленного и рентабельного производства принципиально новых приборов, с одной стороны, требуется возбудить к ним интерес ученых и инженеров путем демонстрации решения ряда новых актуальных задач, которые не могут быть решены с помощью имеющихся приборов, а с другой стороны, пока не будет изготовлено таких приборов в достаточном количестве, не будет и примеров, демонстрирующих их актуальность. Вспомним также, что Нобелевский комитет еще в 1986 г. объединил электронный и сканирующий зондовый микроскопы, присудив за их изобретение общую премию по физике. В настоящее время существуют решения для совмещения СЗМ с ЭМ, повышающие информативность исследования, при этом СЗМ выступает в качестве дополнительной опции к СЭМ [77, 78]. Мы думаем, что имеются все предпосылки для совмещения СЗМ

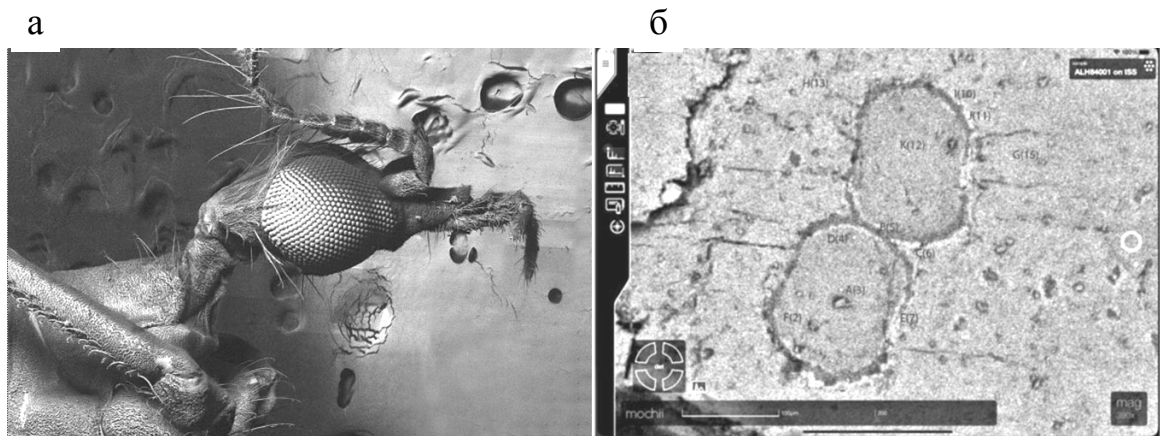


Рис. 16. Электронный микроскоп МОСНП.
а — личинка журавлиной мухи (<https://www.voxa.co/solutions/mochii>); б — изображение включений углерода в образец зерна ALN84001, полученное при помощи СЭМ МОСНП непосредственно на орбитальной станции в 2022 г. [76]

и электронного микроскопа на основе МК путем создания единого устройства с единым аналитическим узлом и едиными аппаратно-программными средствами. Возможно, это один из путей практического использования результатов, полученных при исследованиях в области МЭОС.

ПРИЛОЖЕНИЕ

8500 FE-SEM Specifications

Performance	
Beam voltage:	500 to 2000V
Beam current:	0.2 to 1nA
Resolution:	<10nm at 1000V
Magnification*:	250 to 65,000 X
Digital zoom:	10X
Scan field:	1 x 1mm (max)
Electron source:	Schottky field emission
Detector modes:	SE, BSE, Topo
Sample	
Sample size:	100 x 60mm (max)
Sample thickness:	30mm (max)
Viewable area:	50 x 30mm (max)
Sample mounts:	Standard SEM stubs
Electrical activation:	Vacuum feedthrough
System Control	
PC:	Windows 7
Basic user interface:	Simple image capture and controls
Expert user interface:	Expert image optimization

Image	
Image formats:	JPEG, TIFF, BMP, PNG
Image resolution:	User selectable up to 2048 x 2048 pixels
Scan rate:	Slow scan to video rate
Noise reduction:	Frame and pixel averaging
Motorized Stage	
Piezo stage:	1 µm accuracy
X, Y, Z travel:	50 x 50 x 10mm
Vacuum System	
Chamber vacuum:	1 e-4 Torr
Pumpdown time:	3 minutes
Turbo pump:	80 liters per second
UHV pump:	Ion pump with gettering
Dimensions	
Microscope:	584(W) x 470(D) x 584(H) mm; 72 kg
Pump unit:	203(W) x 254(D) x 203(H) mm; 4 kg
Installation Requirements	
Power:	100/120/220–240 VAC; 50/60 Hz
Operating temperature:	5 to 40°C
Humidity:	20 to 80% RH
Compressed air:	Not required
Dry nitrogen:	Not required**
Water cooling:	Not required
* Electron optical magnification relative to a 3nm pixel on a VGA monitor.	
** A N2 vent port is configured and available.	

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Knoll M., Ruska E. Das elektronenmikroskop // Zeitschrift für Physik. 1932. Vol. 78. P. 318–339. DOI: 10.1007/BF01342199

2. Joy D.C., Joy C.S. Low voltage scanning electron microscopy // Micron. 1996. Vol. 27, no. 3-4. P. 247–263. DOI: 10.1016/0968-4328(96)00023-6

3. Frank L., Hovorka M., Konvalina I., Mikmekova S., Müllerova I. Very low energy scanning electron microscopy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Re-

- search, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2011. Vol. 645, no. 1. P. 46–54. DOI: 10.1016/j.nima.2010.12.214
4. *Murray L.P.* Developments in low-voltage microscopy instrumentation // *Scanning*. 2011. Vol. 33. P. 155–161. DOI: 10.1002/sca.20245
 5. *Fink H.W.* Point source for ions and electrons // *Physica Scripta*. 1988. Vol. 38, no. 2. P. 260–263. DOI: 10.1088/0031-8949/38/2/029
 6. *Crewe D.A., Perng D.C., Shoaf S.E., Feinerman A.D.* Micromachined electrostatic electron source // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1992. Vol. 10. P. 2754–2758. DOI: 10.1116/1.585996
 7. *Kratschmer E., Kim H.S., Thomson M.G.R., Lee K.Y., Rishton S.A., Yu M.L., Chang T.H.P.* Sub-40 nm resolution 1 keV scanning tunneling microscope fieldemission microcolumn // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1994. Vol. 12. P. 3503–3507. DOI: 10.1116/1.587459
 8. *Chang T.H.P., Thomson M.G.R., Yu M.L., Kratschmer E., Kim H.S., Lee K.Y., Rishton S.A., Zolgharnain S.* Electron beam technology – SEM to microcolumn // *Microelectronic Engineering*. 1996. Vol. 32. P. 113–130. DOI: 10.1016/0167-9317(95)00366-5
 9. *Park J.-Y., Choi H.-J., Lee Y., Kang S., Chun K., Park S., Kuk Y.* Construction of STM Aligned Electron Field Emission Source // *Journal de Physique IV France*. 1996. Vol. 06, no. C5. P. C5-285–C5-289. DOI: 10.1051/jp4:1996546
 10. *Park J.-Y., Lera J.-D., Yakshin M.A., Choi S.S., Lee Y., Chun K.J., Lee J.D., Jeon D., Kuk Y.* Fabrication of multiple microcolumn array combined with field emission array // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1997. Vol. 15. P. 2749–2753. DOI: 10.1116/1.589720
 11. *Park J.-Y., Lera J.-D., Choi H.-J., Buh G.H., Kang C.J., Jung J.H., Choi S.S., Jeon D., Kuk Y.* Characterization of two by two electron-beam microcolumn array aligned with field emission array // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1998. Vol. 16, P. 826–828. DOI: 10.1116/1.589915
 12. *Roberts R.H., Gomati M.M., Kudjoe J., Barkshire I.R., Bean S.J., Prutton M.A.* Miniature, all-electrostatic, field emission electron column for surface analytical microscopy // *Measurement Science and Technology*. 1997. Vol. 8, no. 5. Id. 536. DOI: 10.1088/0957-0233/8/5/012
 13. *Zlatkin A., Garcia N.* Low-energy (300 eV) versatile scanning electron microscope with 30 nm resolution // *Microelectronic Engineering*. 1999. Vol. 45, no. 1. P. 39–46. DOI: 10.1016/S0167-9317(98)00260-3
 14. *Zlatkin A., Garcia N.* Functional scanning electron microscope of low energy with integrated electron optical system for nanolithography // *Microelectronic Engineering*. 1999. Vol. 46. P. 213–217. DOI: 10.1016/S0167-9317(99)00065-9
 15. *Ruska E.* The development of the electron microscope and of electron microscopy (Nobel Lecture) // *Angewandte Chemie International Edition in English*. 1987. Vol. 26, iss. 7. P. 595–705. DOI: 10.1002/anie.198705953
 16. *Kratschmer E., Kim H.S., Thomson M.G.R., Lee K.Y., Rishton S.A., Yu M.L., Chang T.H.P.* An electron-beam microcolumn with improved resolution, beam current, and stability // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1995. Vol. 13. P. 2498–2503. DOI: 10.1116/1.588381
 17. *Bubeck C.-D., Fleischmann A., Knell G., Lutsch R.Y., Plies E., Winkler D.* Miniature electrostatic lens for generation of a low-voltage high current electron probe // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 1999. Vol. 427, no. 1-2. P. 104–108. DOI: 10.1016/S0168-9002(98)01552-6
 18. *Kim Y.C., Ahn S.J., Oh T.S., Kim D.W., Kim H.S., Jang W.K.* Low energy microcolumn for large field view inspection // *Ultramicroscopy*. 2011. Vol. 111, no. 12. P. 1645–1649. DOI: 10.1016/j.ultramic.2011.09.016
 19. *Shi Y., Ardanuc S., Lal A.* Micro-Einzel lens for wafer-integrated electron beam actuation // *IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. 2013. P. 189–192. DOI: 10.1109/MEMSYS.2013.6474209
 20. *van Veen A.H.V., Hagen C.W., Barth J.E., Kruit P.* Reduced brightness of the ZrO/W Schottky electron emitter // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2001. Vol. 19, no. 6. P. 2038–2044. DOI: 10.1116/1.1409390
 21. *Schwind G., Magera G., Swanson L.* Comparison of parameters for Schottky and cold field emission sources // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2006. Vol. 24, no. 6. P. 2897–2901. DOI: 10.1116/1.2366675
 22. *Bronsgeest M.S., Barth J.E., Swanson L.W., Kruit P.* Probe current, probe size, and the practical brightness for probe forming systems // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2008. Vol. 26, no. 3. P. 949–955. DOI: 10.1116/1.2907780
 23. *Barth J.E., Kruit P.* Addition of different contributions to the charged particle probe size // *Optik*. 1996. Vol. 101, no 3. P. 101–109.
 24. *Crewe A.V.* Optimization of small electron probes // *Ultramicroscopy*. 1987. Vol. 23, no. 2. P. 159–167. DOI: 10.1016/0304-3991(87)90161-6
 25. *Feinerman A.D., Crewe D.A.* Three-dimensional fabrication of miniature electron optics // *Advances in Imaging and Electron Physics*. 2002. Vol. 121. P. 91–142. DOI: 10.1016/S1076-5670(02)80026-X
 26. *Lloyd J.S.* Miniature electron microscope beam column optics. Dissertations, LOUIS (University of Alabama in Huntsville), 2015. 177 p. URL: <https://louis.uah.edu/uah-dissertations/85>
 27. *Sise O., Ulu M., Dogan M.* Characterization and modeling of multi-element electrostatic lens systems // *Radiation Physics and Chemistry*. 2007. Vol. 76, no. 3. P. 593–598. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2005.11.037
 28. Comsol Documentation https://blogs.ethz.ch/ps_comsol/files/2020/05/COMSOL_MultiphysicsUsersGuide.pdf
 29. *Hawkes P., Kasper E.* Principles of Electron Optics. Elsevier Ltd., vol. 2, 2018. 1455 p.
 30. *Хокс П.* Электронная микроскопия / Перевод с англ. под ред. И.Г. Стояновой. Москва: Мир, 1974. 319 с.
 31. *Ruan Z., Zhang M., Zeng R.G., Ming Y., Da B., Mao S.F., Ding Z.J.* Simulation study of the atomic resolution secondary electron imaging // *Surface and Interface Analysis*. 2014. Vol. 46, no. 12-13. P. 1296–1300. DOI: 10.1002/sia.5565

32. *Steinwand E., Longchamp J.-N., Fink H.-W.* Fabrication and characterization of low aberration micrometer-sized electron lenses // *Ultramicroscopy*. 2010. Vol. 110, no. 9. P. 1148–1153. DOI: 10.1016/j.ultramic.2010.04.013
33. *Oh T.-S., Kim D.-W., Ahn S., Kim H.S.* Improvement of the Probe Current in a Microcolumn by Introducing a Subsidiary Electrode in a Source Lens // *Journal of the Korean Physical Society*. 2013. Vol. 63, no. 6. P. 1128–1133. DOI: 10.3938/jkps.63.1128
34. *Fowler R.H., Nordheim L.* Electron Emission in Intense Electric Fields // *Proceedings of the Royal Society A*. Vol. 119, no. 781. P. 173–181. DOI: 10.1098/rspa.1928.0091
35. *Kim H.S., Kim D.W., Ahn S.J., Kim Y.C., Park S.S.* The Assembly of a Fully Functional Microcolumn and Its STEM-Mode Operation // *Journal of the Korean Physical Society*. 2003. Vol. 43, no. 5. P. 831–835. URL: https://www.jkps.or.kr › journal › download_pdf
36. *Minh P.N., Ono T., Sato N., Mimura H., Esashi M.* Micro-electron field emitter array with focus lenses for multi-electron beam lithography based on silicon on insulator wafer // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2004. Vol. 22, no. 3. P. 1273–1276. DOI: 10.1116/1.1738118
37. *Gaskin J., Abbott T., Medley S., Patty K., Gregory D., Thaisen K., Ramsey B., Jerman G., Sampson A., Harvey R., Taylor L.* Miniaturized Scanning Electron Microscope for In-Situ Planetary Studies // *Proc. "Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments"*. 2010. ASCE. DOI: 10.1061/41096(366)113
38. *Tuggle D.W., Li J.Z., Swanson L.W.* Point cathodes for use in virtual source electron optics // *Journal of Microscopy*. 1985. Vol. 140, no. 3. P. 293–301. DOI: 10.1111/j.1365-2818.1985.tb02683.x
39. *Sise O., Ulu M., Dogan M.* Exploring focal and aberration properties of electrostatic lenses through computer simulation // *Eur. J. Phys.* 2008. Vol. 29, no. 6. P. 1165–1176. DOI: 10.1088/0143-0807/29/6/005
40. *Wen Y., Du Z., Pan L.* Design of electrostatic microcolumn for nanoscale photoemission source in massively parallel electron-beam lithography // *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*. 2015. Vol. 14, no. 4. Id. 043508. 7 pages. DOI: 10.1117/1.JMM.14.4.043508
41. *Cerezo A., Miller M.K.* Einzel lenses in atom probe designs // *Surface Science*. 1991. Vol. 246. P. 450–456. DOI: 10.1016/0039-6028(91)90450-7
42. *Sise O., Ulu M., Dogan M.* Multi-element cylindrical electrostatic lens systems for focusing and controlling charged particles // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2005. Vol. 554, no. 1–3. P. 114–131. DOI: 10.1016/j.nima.2005.08.068
43. *Eastham D.A., Edmondson P., Greene S., Donnelly S., Olsson E., Svensson K., Bleloch A.* A design for a subminiature, low energy scanning electron microscope with atomic resolution // *Journal of Applied Physics*. 2009. Vol. 105, no. 1. Id. 014702. DOI: 10.1063/1.3058602
44. *Krysztof M., Grzebyk T., Górecka-Drzazga A., Adamski K., Dziuban J.* Electron optics column for a new MEMS-type transmission electron microscope // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*. 2018. Vol. 66. P. 133–137. DOI: 10.24425/119067
45. *Krysztof M.* Design of an Einzel Lens with Square Cross-Section // *Electronics*. 2021. Vol. 10, no. 19. Id. 2338. DOI: 10.3390/electronics10192338
46. *Baranova L.A., Yavor S.Ya., Read F.H.* Crossed aperture lenses for the correction of chromatic and aperture aberrations // *Rev. Sci. Instrum.* 1996. Vol. 67, no. 3. P. 756–760. DOI: 10.1063/1.1146805
47. *Krysztof M., Bialas M., Szyska P., Grzebyk T., Górecka-Drzazga A.* Fabrication and characterization of a miniaturized octupole deflection system for the MEMS electron microscope // *Ultramicroscopy*. 2021. Vol. 225. Id. 113288. DOI: 10.1016/j.ultramic.2021.113288
48. *Балашиов В.Н., Данильчев С.С.* Перспективы создания миниатюрных электронно-оптических систем // *Известия РАН. Сер. физич.* 2003. Т. 67, № 4. С. 566–567. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17287629>
49. *Балашиов В.Н., Данильчев С.С.* Перспективы создания адаптивных электронно-оптических систем // *Известия РАН. Сер. физич.* 2003. Т. 67, № 4. 2003, С. 563–565. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17287628>
50. *Данильчев С.С., Балашиов В.Н.* Миниатюрная электронно-оптическая система. Патент РФ по заявке № 2004120393/22 (023284) от 14.07.2004 г. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000045202_20050427_U1_RU/
51. *van Bruggen M.J., van Someren B., Kruit P.* Electron optics of skewed micro-Einzel lenses // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2009. Vol. 27. P. 139–147. DOI: 10.1116/1.3071850
52. *Oh T.-S., Kim H.-S., Ahn S., Kim D.W.* Design of an ultra-miniaturized electron optical microcolumn with sub-5 nm very high resolution // *Ultramicroscopy*. 2014. Vol. 136. P. 171–175. DOI: 10.1016/j.ultramic.2013.10.003
53. *Kim H.W., Lee Y.B., Kim D.-W., Ahn S., Oh T.-S., Kim H.S., Kim Y.C.* Variations of the field of view depending on the Si deflector shape in a microcolumn // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2018. Vol. 36, no. 6. Id. 06J902. DOI: 10.1116/1.5048128
54. *Williams D.B., Carter C.B.* Transmission Electron Microscopy A. Textbook for Materials Science. Springer, 2009. 779 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-76501-3>
55. *van Aken R.H., Hagen V., Barth J.E., Kruit P.* Low-energy foil aberration corrector // *Ultramicroscopy*. 2002. Vol. 93, no. 3–4. P. 321–330. DOI: 10.1016/S0304-3991(02)00287-5
56. *Kazmiruk V.V., Savitskaja T.N.* New Principles of Designing Multibeam Electron-Optical Microsystems for Diagnostics of Semiconductor Structures // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2009. Vol. 73, no. 4. P. 461–464. DOI: 10.3103/S1062873809040042
57. *van Aken R.H., Maas D.J., Hagen C.W., Barth J.E., Kruit P.* Design of an aberration corrected low-voltage SEM // *Ultramicroscopy*. 2010. Vol. 110, no. 11. P. 1411–1419. DOI: 10.1016/j.ultramic.2010.07.012
58. *Gaskin J., Jerman G., Medley S., Gregory D., Abbott T., Sampson A.* Simulation and characterization of a miniaturized Scanning Electron Microscope // *IEEE Aerospace*

- Conference Proceedings. 2011. P. 1–10. DOI: 10.1109/AERO.2011.5747297
59. Crewe A.V., Eggenberger D.N., Wall J., Welter L.M. Electron Gun Using a Field Emission Source // *Rev. Sci. Instrum.* 1968. Vol. 39, no. 4. P. 576–583. DOI: 10.1063/1.1683435
 60. Laszczyk K., Krysztof M. Electron beam source for the miniaturized electron microscope on-chip // *Vacuum*. 2021. Vol. 189. Id. 110236. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110236
 61. Sharma A., Kanth S.K., Kim H.S., Kim D.-W., Ahn S.J., Oh T.-S., Kim Y.C. Comparison of Electron Emission Characteristics of W and CNT Field Emitter for Microcolumn // *Asian Journal of Chemistry*. 2017. Vol. 29, no. 8. P. 1690–1692. DOI: 10.14233/ajchem.2017.20543
 62. Shao X., Srinivasan A., Ang W.K., Khursheed A. A high-brightness large-diameter graphene coated point cathode field emission electron source // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. Id. 1288. DOI: 10.1038/s41467-018-03721-y
 63. van Aken R.H., Janssen M.A.P.M., Hagen C.W., Kruit V. A simple fabrication method for tunnel junction emitters // *Solid-State Electronics*. 2001. Vol. 45, no. 6. P. 1033–1038. DOI: 10.1016/S0038-1101(01)00153-8
 64. Горбенко О.М., Сапожников И.Д., Вересов С.О., Фельштын М.Л., Голубок А.О. Исследование электронно-оптической системы с электростатической микролинзой и автоэмиссионным катодом на основе СТМ // XXIX Симпозиум "Нанозлектроника", Н-Новгород, 10-14 марта 2025 г. Тезисы докладов. С. 447–447. URL: <https://nanosymp.ru/ru/proceedings>
 65. Wicki F., Longchamp J.-N., Escher C., Fink H.-W. Design and implementation of a micron-sized electron column fabricated by focused ion beam milling // *Ultramicroscopy*. 2016. Vol. 160. P. 74–79. DOI: 10.1016/j.ultramic.2015.09.013
 66. Sinno I., Sanz-Velasco A., Kang S., Jansen H., Olsson E., Enoksson P., Svensson K. Fabrication of nanoscale electrostatic lenses // *J. Micromech. Microeng.* 2010. Vol. 20, no. 9. Id. 095031 (7 pages). DOI: 10.1088/0960-1317/20/9/095031
 67. Lutsch R.Y., Plies E. Initial resolution measurements of miniaturized electrostatic lenses for LVSEM // *Ultramicroscopy*. 2002. Vol. 93, no. 3-4. P. 339–345. DOI: 10.1016/S0304-3991(02)00289-9
 68. Muray L.P., Silver C.S., Spallas J.P. Sub- lithography with miniature electron beam columns // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 2006. Vol. 24, no. 6. P. 2945–2950. DOI: 10.1116/1.2375088
 69. Spallas J.P., Silver C.S., Muray L.P., Wells T., El-Gomati M. A manufacturable miniature electron beam column // *Microelectronic Engineering*. 2006. Vol. 83, no. 4-9. P. 984–989. DOI: 10.1016/j.mee.2006.01.245
 70. Kazmiruk V., Savitskaja T. Electron Optic Design of Arrayed E-Beam Microcolumns Based Systems for Wafer Defects Inspection // *arXiv:0805.0495v1 [physics.optics]*. 2008. 16 pages. DOI: 10.48550/arXiv.0805.0495
 71. Suwal O.K., Sharma A., Lee Y.B., Oh T.S., Kim D.W., Kim H.S. Influence of Einzel lens structure on the performance of a microcolumn fabricated through MEMS technology // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 694-697. P. 1001–1007. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.694-697.1001
 72. Longchamp J.-N., Latychevskaia T., Escher C., Fink H.-W. Non-destructive imaging of an individual protein // *Phys. Lett.* 2012. Vol. 101, no. 9. Id. 093701. DOI: 10.1063/1.4748113
 73. Gaskin J., Jerman G., Gregory D., Sampson A. Miniature Variable Pressure Scanning Electron Microscope for in-situ imaging & chemical analysis // *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. 2012. P. 1–10. DOI: 10.1109/AERO.2012.6187064
 74. Own C. et al. Mochii Portable Spectroscopic Electron Microscope on Iss: Progress Toward Flight // 50th Lunar and Planetary Science Conference 2019 (LPI Contrib. No. 2132), 2019. URL: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/pdf/3238.pdf>
 75. Own C., Murfitt M.F. Mochii. United States Patent No. US 9,997,331. B1. 12.06.2018.
 76. Own C., Clemett S., Zia R., Martinez J., Own S., Morales Z., Koene R., Pettit D.R. Electron Microscopy and Analysis of Martian Meteorite ALH84001 with Mochii ISS-NL on the International Space Station // *Microscopy and Microanalysis*. 2022. Vol. 28, no. S1. P. 2712–2718. DOI: 10.1017/S1431927622010224
 77. Golubok A.O., Timofeev V.A. STM combined with SEM without SEM capability limitations // *Ultramicroscopy*. 1992. Vol. 42-44, part 2. P. 1558-1563. DOI: 10.1016/0304-3991(92)90483-Z
 78. Sapozhnikov I.D., Gorbenko O.M., Felshtyn M.L., Zhukov M.V., Golubok A.O. Features of combining of scanning probe microscopy with optical and scanning electron microscopy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 699. Id. 012040. (6 pages). DOI: 10.1088/1757-899X/699/1/012040

**Академический Университет им. Ж.И. Алфорова,
г. Санкт-Петербург (Вересов С.О.)**

**Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург (Горбенко О.М., Голубок А.О.)**

Контакты: Горбенко Ольга Марковна,
gorolga64@gmail.com

Материал поступил в редакцию 26.07.2025

LOW-VOLTAGE MINIATURIZED ELECTRON-OPTICAL SYSTEMS. REVIEW

S. O. Veresov¹, O. M. Gorbenko², A. O. Golubok²

¹Academic University named after J.I. Alferov, Saint Petersburg, Russia

²Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint Petersburg, Russia

Low-voltage miniaturized electron-optical systems, which are also called micro-columns, represent an independent direction in the field of electronic optics and are the basis of low-voltage miniature electron microscopes, multi-column lithographs and electronic holography systems. The review contains works on micro-columns with various electron-optical schemes, including modeling of electric field distribution, electronic trajectories, aberrations and spatial resolution, as well as a description of the used electronic sources and technologies for micro columns manufacturing.

Keywords: low-voltage electron microscopy, miniaturized electron-optical systems, microcolumns, electrostatic microlens, point sources of electrons, spatial resolution, aberration of electron-optical systems, group technologies of microelectronics, silicon technologies

REFERENCES

- Knoll M., Ruska E. Das elektronenmikroskop. *Zeitschrift für Physik*, 1932, vol. 78, pp. 318–339. DOI: 10.1007/BF01342199
- Joy D.C., Joy C.S. Low voltage scanning electron microscopy. *Micron*, 1996, vol. 27, no 3-4, pp. 247–263. DOI: 10.1016/0968-4328(96)00023-6
- Frank L., Hovorka M., Konvalina I., Mikmekova S., Müllerova I. Very low energy scanning electron microscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, vol. 645, no. 1, pp. 46–54. DOI: 10.1016/j.nima.2010.12.214
- Murray L.P. Developments in low-voltage microscopy instrumentation. *Scanning*, 2011, vol. 33, pp. 155–161. DOI: 10.1002/sca.20245
- Fink H.W. Point source for ions and electrons. *Physica Scripta*, 1988, vol. 38, no. 2, pp. 260–263. DOI: 10.1088/0031-8949/38/2/029
- Crewe D.A., Perng D.C., Shoaf S.E., Feinerman A.D. Micromachined electrostatic electron source. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1992, vol. 10, pp. 2754–2758. DOI: 10.1116/1.585996
- Kratschmer E., Kim H.S., Thomson M.G.R., Lee K.Y., Rishton S.A., Yu M.L., Chang T.H.P. Sub-40 nm resolution 1 keV scanning tunneling microscope fieldemission microcolumn. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1994, vol. 12, pp. 3503–3507. DOI: 10.1116/1.587459
- Chang T.H.P., Thomson M.G.R., Yu M.L., Kratschmer E., Kim H.S., Lee K.Y., Rishton S.A., Zolgharnain S. Electron beam technology – SEM to microcolumn. *Microelectronic Engineering*, 1996, vol. 32, no. 1-4, pp. 113–130. DOI: 10.1016/0167-9317(95)00366-5
- Park J.-Y., Choi H.-J., Lee Y., Kang S., Chun K., Park S., Kuk Y. Construction of STM Aligned Electron Field Emission Source. *Journal de Physique IV France*, 1996, vol. 06, no. C5, pp. C5-285–C5-289. DOI: 10.1051/jp4:1996546
- Park J.-Y., Lera J.-D., Yakshin M.A., Choi S.S., Lee Y., Chun K.J., Lee J.D., Jeon D., Kuk Y. Fabrication of multiple microcolumn array combined with field emission array. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1997, vol. 15, pp. 2749–2753. DOI: 10.1116/1.589720
- Park J.-Y., Lera J.-D., Choi H.-J., Buh G.H., Kang C.J., Jung J.H., Choi S.S., Jeon D., Kuk Y. Characterization of two by two electron-beam microcolumn array aligned with field emission array. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1998, vol. 16, pp. 826–828. DOI: 10.1116/1.589915
- Roberts R.H., Gomati M.M., Kudjoe J., Barkshire I.R., Bean S.J., Prutton M.A. Miniature, all-electrostatic, field emission electron column for surface analytical microscopy. *Measurement Science and Technology*, 1997, vol. 8, no. 5, Id. 536. DOI: 10.1088/0957-0233/8/5/012
- Zlatkin A., Garcia N. Low-energy (300 eV) versatile scanning electron microscope with 30 nm resolution. *Microelectronic Engineering*, 1999, vol. 45, no. 1, pp. 39–46. DOI: 10.1016/S0167-9317(98)00260-3
- Zlatkin A., Garcia N. Functional scanning electron microscope of low energy with integrated electron optical system for nanolithography. *Microelectronic Engineering*, 1999, vol. 46, no. 1-4, pp. 213–217. DOI: 10.1016/S0167-9317(99)00065-9
- Ruska E. The development of the electron microscope and of electron microscopy (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie International Edition in English*, 1987, vol. 26, no. 7, pp. 595–705. DOI: 10.1002/anie.198705953
- Kratschmer E., Kim H.S., Thomson M.G.R., Lee K.Y., Rishton S.A., Yu M.L., Chang T.H.P. An electron-beam microcolumn with improved resolution, beam current, and stability. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1995, vol. 13, pp. 2498–2503. DOI: 10.1116/1.588381
- Bubeck C.-D., Fleischmann A., Knell G., Lutsch R.Y., Plies E., Winkler D. Miniature electrostatic lens for gen-

- eration of a low-voltage high current electron probe. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1999, vol. 427, no. 1-2, pp. 104–108. DOI: 10.1016/S0168-9002(98)01552-6
18. Kim Y.C., Ahn S.J., Oh T.S., Kim D.W., Kim H.S., Jang W.K. Low energy microcolumn for large field view inspection. *Ultramicroscopy*, 2011, vol. 111, no. 12, pp. 1645–1649. DOI: 10.1016/j.ultramic.2011.09.016
 19. Shi Y., Ardanuc S., Lal A. Micro-Einzel lens for wafer-integrated electron beam actuation. *IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2013, pp. 189–192. DOI: 10.1109/MEMSYS.2013.6474209
 20. van Veen A.H.V., Hagen C.W., Barth J.E., Kruit P. Reduced brightness of the ZrO/W Schottky electron emitter. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2001, vol. 19, no. 6, pp. 2038–2044. DOI: 10.1116/1.1409390
 21. Schwind G., Magera G., Swanson L. Comparison of parameters for Schottky and cold field emission sources. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2006, vol. 24, no. 6, pp. 2897–2901. DOI: 10.1116/1.2366675
 22. Bronsgeest M.S., Barth J.E., Swanson L.W., Kruit P. Probe current, probe size, and the practical brightness for probe forming systems. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2008, vol. 26, no. 3, pp. 949–955. DOI: 10.1116/1.2907780
 23. Barth J.E., Kruit P. Addition of different contributions to the charged particle probe size. *Optik*, 1996, vol. 101, no. 3, pp. 101–109.
 24. Crewe A.V. Optimization of small electron probes. *Ultramicroscopy*, 1987, vol. 23, no. 2, pp. 159–167. DOI: 10.1016/0304-3991(87)90161-6
 25. Feinerman A.D., Crewe D.A. Three-dimensional fabrication of miniature electron optics. *Advances in Imaging and Electron Physics*, 2002, vol. 121, pp. 91–142. DOI: 10.1016/S1076-5670(02)80026-X
 26. Loyd J.S. *Miniature electron microscope beam column optics*. Dissertations. LOUIS (University of Alabama in Huntsville), 2015. 177 p. URL: <https://louis.uah.edu/uah-dissertations/85>
 27. Sise O., Ulu M., Dogan M. Characterization and modeling of multi-element electrostatic lens systems. *Radiation Physics and Chemistry*, 2007, vol. 76, no. 3, pp. 593–598. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2005.11.037
 28. Comsol. *Comsol Multiphysics. User's Guide. Version 4.3*. https://blogs.ethz.ch/ps_comsol/files/2020/05/COMSOL-MultiphysicsUsersGuide.pdf
 29. Hawkes P., Kasper E. *Principles of Electron Optics*. Elsevier Ltd., vol. 2, 2018. 1455 p.
 30. Hawkes P. *The Beginning of Electron Microscopy*. (Russ. ed.: Khoks P. *Ehlektronnaya mikroskopiya*. Transl. from eng. I.G. Stoyanova. Moscow: Mir Publ., 1974. 319 p.).
 31. Ruan Z., Zhang M., Zeng R.G., Ming Y., Da B., Mao S.F., Ding Z.J. Simulation study of the atomic resolution secondary electron imaging. *Surface and Interface Analysis*, 2014, vol. 46, no. 12-13, pp. 1296–1300. DOI: 10.1002/sia.5565
 32. Steinwand E., Longchamp J.-N., Fink H.-W. Fabrication and characterization of low aberration micrometer-sized electron lenses. *Ultramicroscopy*, 2010, vol. 110, no. 9, pp. 1148–1153. DOI: 10.1016/j.ultramic.2010.04.013
 33. Oh T.-S., Kim D.-W., Ahn S., Kim H.S. Improvement of the Probe Current in a Microcolumn by Introducing a Subsidiary Electrode in a Source Lens. *Journal of the Korean Physical Society*, 2013, vol. 63, no. 6, pp. 1128–1133. DOI: 10.3938/jkps.63.1128
 34. Fowler R.H., Nordheim L. Electron Emission in Intense Electric Fields. *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 119, no. 781, pp. 173–181. DOI: 10.1098/rspa.1928.0091
 35. Kim H.S., Kim D.W., Ahn S.J., Kim Y.C., Park S.S. The Assembly of a Fully Functional Microcolumn and Its STEM-Mode Operation. *Journal of the Korean Physical Society*, 2003, vol. 43, no. 5, pp. 831–835. URL: https://www.jkps.or.kr/journal/download_pdf
 36. Minh P.N., Ono T., Sato N., Mimura H., Esashi M. Microelectron field emitter array with focus lenses for multi-electron beam lithography based on silicon on insulator wafer. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2004, vol. 22, no. 3, pp. 1273–1276. DOI: 10.1116/1.1738118
 37. Gaskin J., Abbott T., Medley S., Patty K., Gregory D., Thaisen K., Ramsey B., Jerman G., Sampson A., Harvey R., Taylor L. Miniaturized Scanning Electron Microscope for In-Situ Planetary Studies. *Proc. "Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments"*. ASCE, 2010. DOI: 10.1061/41096(366)113
 38. Tuggle D.W., Li J.Z., Swanson L.W. Point cathodes for use in virtual source electron optics. *Journal of Microscopy*, 1985, vol. 140, no. 3, pp. 293–301. DOI: 10.1111/j.1365-2818.1985.tb02683.x
 39. Sise O., Ulu M., Dogan M. Exploring focal and aberration properties of electrostatic lenses through computer simulation. *Eur. J. Phys.*, 2008, vol. 29, no. 6, pp. 1165–1176. DOI: 10.1088/0143-0807/29/6/005
 40. Wen Y., Du Z., Pan L. Design of electrostatic microcolumn for nanoscale photoemission source in massively parallel electron-beam lithography. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 2015, vol. 14, no. 4, Id. 043508. 7 pages. DOI: 10.1117/1.JMM.14.4.043508
 41. Cerezo A., Miller M.K. Einzel lenses in atom probe designs. *Surface Science*, 1991, vol. 246, no. 1-3, pp. 450–456. DOI: 10.1016/0039-6028(91)90450-7
 42. Sise O., Ulu M., Dogan M. Multi-element cylindrical electrostatic lens systems for focusing and controlling charged particles. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, vol. 554, no. 1-3, pp. 114–131. DOI: 10.1016/j.nima.2005.08.068
 43. Eastham D.A., Edmondson P., Greene S., Donnelly S., Olsson E., Svensson K., Bleloch A. A design for a subminiature, low energy scanning electron microscope with atomic resolution. *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 105, no. 1, Id. 014702. DOI: 10.1063/1.3058602
 44. Krysztof M., Grzebyk T., Górecka-Drzazga A., Adamski K., Dziuban J. Electron optics column for a new MEMS-type transmission electron microscope. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 2018, vol. 66, pp. 133–137. DOI: 10.24425/119067

45. Krysztof M. Design of an Einzel Lens with Square Cross-Section. *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 19, Id. 2338. DOI: 10.3390/electronics10192338
46. Baranova L.A., Yavor S.Ya., Read F.H. Crossed aperture lenses for the correction of chromatic and aperture aberrations. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, vol. 67, no. 3, pp. 756–760. DOI: 10.1063/1.1146805
47. Krysztof M., Białas M., Szyszka P., Grzebyk T., Górecka-Drzazga A. Fabrication and characterization of a miniaturized octupole deflection system for the MEMS electron microscope. *Ultramicroscopy*, 2021, vol. 225, Id. 113288. DOI: 10.1016/j.ultramic.2021.113288
48. Balashov V.N., Danil'chev S.S. [Prospects of miniature electron-optical systems]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics], 2003, vol. 67, no. 4, pp. 566–567. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17287629> (In Russ.).
49. Balashov V.N., Danil'chev S.S. [Prospects of adaptive electron-optical systems]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics], 2003, vol. 67, no. 4, pp. 563–565. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17287628> (In Russ.).
50. Danil'chev S.S., Balashov V.N. *Miniaturnaya ehlektronno-opticheskaya sistema* [Patent for useful model for miniature electro-optical system]. Patent RF no. 45202 U1, Prioritet 14.07.2004. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000045202_20050427_U1_RU/ (In Russ.).
51. van Bruggen M.J., van Someren B., Kruit P. Electron optics of skewed micro-Einzel lenses. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2009, vol. 27, pp. 139–147. DOI: 10.1116/1.3071850
52. Oh T.-S., Kim H.-S., Ahn S., Kim D.W. Design of an ultra-miniaturized electron optical microcolumn with sub-5 nm very high resolution. *Ultramicroscopy*, 2014, vol. 136, pp. 171–175. DOI: 10.1016/j.ultramic.2013.10.003
53. Kim H.W., Lee Y.B., Kim D.-W., Ahn S., Oh T.-S., Kim H.S., Kim Y.C. Variations of the field of view depending on the Si deflector shape in a microcolumn. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2018, vol. 36, no. 6, Id. 06J902. DOI: 10.1116/1.5048128
54. Williams D.B., Carter C.B. *Transmission Electron Microscopy A. Textbook for Materials Science*. Springer, 2009. 779 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-76501-3>
55. van Aken R.H., Hagen V., Barth J.E., Kruit P. Low-energy foil aberration corrector. *Ultramicroscopy*, 2002, vol. 93, no. 3-4, pp. 321–330. DOI: 10.1016/S0304-3991(02)00287-5
56. Kazmiruk V.V., Savitskaja T.N. New Principles of Designing Multibeam Electron-Optical Microsystems for Diagnostics of Semiconductor Structures. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2009, vol. 73, no. 4, pp. 461–464. DOI: 10.3103/S1062873809040042
57. van Aken R.H., Maas D.J., Hagen C.W., Barth J.E., Kruit P. Design of an aberration corrected low-voltage SEM. *Ultramicroscopy*, 2010, vol. 110, no. 11, pp. 1411–1419. DOI: 10.1016/j.ultramic.2010.07.012
58. Gaskin J., Jerman G., Medley S., Gregory D., Abbott T., Sampson A. Simulation and characterization of a miniaturized Scanning Electron Microscope. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2011, pp. 1–10. DOI: 10.1109/AERO.2011.5747297
59. Crewe A.V., Eggenberger D.N., Wall J., Welter L.M. Electron Gun Using a Field Emission Source. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, vol. 39, no. 4, pp. 576–583. DOI: 10.1063/1.1683435
60. Laszczyk K., Krysztof M. Electron beam source for the miniaturized electron microscope on-chip. *Vacuum*, 2021, vol. 189, Id. 110236. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110236
61. Sharma A., Kanth S.K., Kim H.S., Kim D.-W., Ahn S.J., Oh T.-S., Kim Y.C. Comparison of Electron Emission Characteristics of W and CNT Field Emitter for Microcolumn. *Asian Journal of Chemistry*, 2017, vol. 29, no. 8, pp. 1690–1692. DOI: 10.14233/ajchem.2017.20543
62. Shao X., Srinivasan A., Ang W.K., Khursheed A. A high-brightness large-diameter graphene coated point cathode field emission electron source. *Nature Communications*, 2018, vol. 9, Id. 1288. DOI: 10.1038/s41467-018-03721-y
63. van Aken R.H., Janssen M.A.P.M., Hagen C.W., Kruit V. A simple fabrication method for tunnel junction emitters. *Solid-State Electronics*, 2001, vol. 45, no 6, pp. 1033–1038. DOI: 10.1016/S0038-1101(01)00153-8
64. Gorbenko O.M., Sapozhnikov I.D., Veresov S.O., Felshytyn M.L., Golubok A.O. [Study of an electron-optical system with an electrostatic microlens and a field-emission cathode based on STM]. *XXIX Simpozium "Nanofizika i Nanoehlektronika"* [XXIX Symp. "Nanophysics and Nanoelectronics"], Nizhny Novgorod, 10–14 Mar 2025, pp. 447–447. URL: <https://nanosymp.ru/ru/proceedings> (In Russ.).
65. Wicki F., Longchamp J.-N., Escher C., Fink H.-W. Design and implementation of a micron-sized electron column fabricated by focused ion beam milling. *Ultramicroscopy*, 2016, vol. 160, pp. 74–79. DOI: 10.1016/j.ultramic.2015.09.013
66. Sinno I., Sanz-Velasco A., Kang S., Jansen H., Olsson E., Enoksson P., Svensson K. Fabrication of nanoscale electrostatic lenses. *J. Micromech. Microeng.*, 2010, vol. 20, no. 9, Id. 095031 (7 pages). DOI: 10.1088/0960-1317/20/9/095031
67. Lutsch R.Y., Plies E. Initial resolution measurements of miniaturized electrostatic lenses for LVSEM. *Ultramicroscopy*, 2002, vol. 93, no 3-4, pp. 339–345. DOI: 10.1016/S0304-3991(02)00289-9
68. Muray L.P., Silver C.S., Spallas J.P. Sub- lithography with miniature electron beam columns. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2006, vol. 24, no. 6, pp. 2945–2950. DOI: 10.1116/1.2375088
69. Spallas J.P., Silver C.S., Muray L.P., Wells T., El-Gomati M. A manufacturable miniature electron beam column. *Microelectronic Engineering*, 2006, vol. 83, no. 4-9, pp. 984–989. DOI: 10.1016/j.mee.2006.01.245
70. Kazmiruk V., Savitskaja T. Electron Optic Design of Arrayed E-Beam Microcolumns Based Systems for Wafer Defects Inspection. In: *arXiv:0805.0495v1 [physics.optics]*, 2008, 16 pages. DOI: 10.48550/arXiv.0805.0495

71. Suwal O.K., Sharma A., Lee Y.B., Oh T.S., Kim D.W., Kim H.S. Influence of Einzel lens structure on the performance of a microcolumn fabricated through MEMS technology. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 694-697, pp. 1001–1007. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.694-697.1001
72. Longchamp J.-N., Latychevskaia T., Escher C., Fink H.-W. Non-destructive imaging of an individual protein. *Phys. Lett.*, 2012, vol. 101, no. 9, Id. 093701. DOI: 10.1063/1.4748113
73. Gaskin J., Jerman G., Gregory D., Sampson A. Miniature Variable Pressure Scanning Electron Microscope for in-situ imaging & chemical analysis. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2012, pp. 1–10. DOI: 10.1109/AERO.2012.6187064
74. Own C. et al. Mochii Portable Spectroscopic Electron Microscope on Iss: Progress Toward Flight. *50th Lunar and Planetary Science Conference 2019 (LPI Contrib. No. 2132)*, 2019. URL: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/pdf/3238.pdf>
75. Own C., Murfitt M.F. *Mochii*. United States Patent No. US 9.997.331. B1. 12.06.2018.
76. Own C., Clemett S., Zia R., Martinez J., Own S., Morales Z., Koene R., Pettit D.R. Electron Microscopy and Analysis of Martian Meteorite ALH84001 with Mochii ISS-NL on the International Space Station. *Microscopy and Microanalysis*, 2022, vol. 28, no. S1, pp. 2712–2718. DOI: 10.1017/S1431927622010224
77. Golubok A.O., Timofeev V.A. STM combined with SEM without SEM capability limitations. *Ultramicroscopy*, 1992, vol. 42-44, part 2, pp. 1558–1563. DOI: 10.1016/0304-3991(92)90483-Z
78. Sapozhnikov I.D., Gorbenko O.M., Felshtyn M.L., Zhukov M.V., Golubok A.O. Features of combining of scanning probe microscopy with optical and scanning electron microscopy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 699, Id. 012040. (6 pages). DOI: 10.1088/1757-899X/699/1/012040

Contacts: Gorbenko Olga Markovna,
gorolga64@gmail.com

Article received by the editorial office on 26.07.2025

INTRODUCTION

Electron microscopy has a century-long history of development. The first images obtained using an electron beam on a fluorescent screen in a glass flask from which the air had been evacuated were significantly inferior in quality to optical images. But in 1931 in Germany, Max Knoll and Ernst Ruska [1] created a prototype of a modern electron microscope (EM) with magnetic lenses and a spatial resolution exceeding that of an optical microscope, and in 1939, industrial prototypes began to be manufactured. Modern EM has a spatial resolution that allows one to observe individual atoms and is used in various fields of science and technology, from materials science to cytology and electron lithography. To obtain atomic spatial resolution, large-sized high-voltage EMs with a focused electron beam energy of $(10^5\text{--}10^6)$ eV are created. EMs with low-energy electron beams have certain advantages, including a non-destructive effect on the sample, increased image contrast [2] due to the penetration of electrons only into the surface layers of the sample (Fig. 1), and the possibility of using poorly conducting samples without depositing metal coatings.

Fig. 1. Improved EM image detail with decreasing electron beam energy. Images of a copper grid coated with a thin carbon film, obtained at beam energies of 20 keV (a) and 1 keV (б) [2]

As early as the 1940s, EMs operating at reduced voltage appeared [3, 4], but these were still large-sized and expensive devices. Meanwhile, according to the principle of scaling electron-optical systems (EOS), a simultaneous decrease in all geometric characteristics and voltages on the electrodes preserves the focusing properties of the system. Therefore, starting from the late 1980s, miniature low-voltage and, naturally, cheaper EOSs began to be created [5–14]. An important advantage of the miniaturized electron-optical system (MEOS) is the reduction of aberrations and the lowering of requirements for the vacuum system. MEOS are usually manufactured using electrostatic lenses, since they are easier to miniaturize. The main disadvantage of MEOS is the small focal length. Since aberrations increase when the beam deviates from the optical axis, this imposes a limitation on the deviation angle and, due to the small focal length, leads to a decrease in the area of the viewing frame. In the manufacture of MEOS, both traditional precision engineering technologies and group silicon microelectronic technologies are used. The latter circumstance opens the way to the creation of multi-column MEOS,

which are of particular interest for electron lithography due to the possibility of a revolutionary increase in its productivity. In 1986, Ernst Ruska, together with the inventors of the scanning tunneling microscope (STM), Gerd Binnig and Heinrich Rohrer, won the Nobel Prize in Physics for their fundamental work in electron optics and the creation of the first electron microscope [15]. It is interesting that the advent of the STM stimulated work on MEOS, which began to actively use precision piezoelectric actuators and tracking systems used in STM. This review covers the available work on MEOS and low-voltage EMs based on them.

1. ELECTRON-OPTICAL SYSTEM BASED ON ELECTROSTATIC LENSES

1.1. *Typical schemes of microcolumns based on electrostatic lenses*

Usually, the microcolumn (MC) of the MEOS (Fig. 2, a) consists of the following parts:

- emitter (electron source, cathode);
- source lenses, including a limiting aperture;
- deflector (deflecting system);
- objective lens (usually a single lens or a system of lenses);
- detector (usually a microchannel plate and a CCD matrix).

The source lenses, also called microlenses, are usually presented as a system of two or three electrodes. In the first case, this is an extraction electrode (extractor) and an anode (accelerator). The extractor forms a beam with the required current value, and the anode imparts a given energy to the beam. In the second case, which includes most of the known systems, an additional focusing electrode is placed between the extractor and the anode [7, 16–18].

Fig. 2. Microcolumn diagrams.
a — A-type MC (with objective lens),
б — B-type MC (without objective lens)

A single lens (Einzel lens, OL) or an OL system [19] is usually used as an objective lens in A-type MCs. Einzel lenses are chosen as a typical objective lens in MCs because they have a well-adjustable focusing effect in both the accelerating (when the potential of the central electrode is higher than the potential of the outer electrodes of the lens) and decelerating (when the potential of the central electrode is lower than the potential of the outer electrodes) modes. In addition, the energy of the beam emerging from the OL is equal to the energy of the incoming beam.

The Einzel lens is surrounded by a field-free region. The outer electrodes of the OL are usually grounded, which avoids sample polarization. The distance between the microlens output and the Einzel lens input is several hundred microns.

In addition to A-type MCs, the literature also discusses MCs that lack an objective lens — we will call them B-type MCs (Fig. 2, b). The advantages of such a structure are the comparative simplicity of adjustment and the absence of aberrations created by the objective lens. Since aberrations increase with beam deviation from the axis, this limits the size of the overview frame during scanning, especially at a short focal length, typical of electrostatic lenses.

1.2. Microcolumn parameters

A system consisting of an emitter (cathode) and emitter microlenses is often called an electron gun. The electron beam in the image (sample) region is called an electron probe.

The MC is characterized by the following main parameters:

- electron probe energy E_p ;
- brightness β ;
- electron probe current I_p ;
- size (diameter) of the electron probe d_p ;
- magnification M ;
- convergence angle α_p (α_1).

All of the listed MC parameters are interrelated.

In the process of developing each MC, they strive to obtain the brightest possible electron beam on the sample, where the brightness is called

$$\beta = \frac{\text{current}}{\text{square} \times \text{solid angle}} = \frac{I_p}{\left(\frac{\pi d_p^2}{4}\right) \pi \alpha_p^2} = \frac{4I_p}{\pi^2 d_p^2 \alpha_p^2}, \quad (1)$$

where I_p , d_p , α_p are the current, diameter, and convergence angle of the beam in the image area, respectively. It is clear from this expression that to increase the brightness, the current in the beam should be increased, and its diameter and convergence angle should be reduced.

In practice, to characterize the electron source, the "reduced" (normalized) brightness β_r is used, since its value remains unchanged during the passage of the beam through the MC [20, 21]

$$\beta_r = \frac{\beta}{V}, \quad (2)$$

where V is the potential of the electron beam.

The current I_p is determined by the angle α_0 of the beam divergence at the exit from the source:

$$I_p = \pi \alpha_0^2 \frac{dI}{d\Omega}, \quad (3)$$

where $dI / d\Omega$ is the angular density of the emission current.

The magnification of the microcolumn M is determined by the ratio of the distances from the main plane of the lens to the object (P) and to the image (Q)

$$M = \frac{P}{Q} = \frac{\alpha_0}{\alpha_p}. \quad (4)$$

An important relationship for calculating the magnification of the EOS is the Helmholtz–Lagrange law, which for small angles can be written in the form:

$$\alpha_1 h_1 \sqrt{V_1} = \alpha_2 h_2 \sqrt{V_2}, \quad (5)$$

where α_i , h_i , V_i ($i = 1, 2$) is half the convergence (divergence) angle of the beam, the height of the object, and the potential in two regions along the beam axis with marks 1 and 2, respectively. This law is an important fundamental limitation, linking the aperture and the size of the object with the aperture and the size of the image, and shows that the structure of the transformed beam can only be such that the Lagrange–Helmholtz condition allows.

The key parameter is the size of the electron beam in the image region (the size of the electron probe) d_p , since it affects the lateral resolution of the MC. Optimization of the size of the electron probe consists in determining the aperture angle and the magnification from the source to the probe, which provide the smallest probe size or the highest current at a certain probe size.

The working distance (WD) is the distance from the last aperture to the image. The working distance is approximately equal to the distance Q ; thus, the larger the WD, the greater the magnification of the MC.

The image in the MC is usually a direct image of the virtual source, since there is usually no intermediate crossing in the MC. The virtual source is the area of intersection of the rays formed during emission if they are extended in the direction opposite to propagation [22].

Like the optics of light, the optics of charged particles suffers from aberrations and image distortions. First of all, this concerns spherical and chromatic aberrations. In electrostatic lenses, spherical aberration occurs because even in a sufficiently narrow beam, the trajectories of electrons have different angles relative to the optical axis. The cause of chromatic aberrations is the different kinetic energy of otherwise identical particles, which are therefore not focused at the same point. Thus, an electrostatic lens cannot focus

a point object to a point on the image plane due to the presence of aberrations.

Aberrations and the magnification of the MC determine the size of the electron probe, according to the expressions:

$$d_p = (d_g^2 + d_d^2 + d_s^2 + d_c^2)^{1/2}, \quad (6)$$

$$d_g = d_0 M, \quad (7)$$

$$d_s = 0.5 C_s \alpha_p^3, \quad (8)$$

$$d_d = \frac{1.5}{\alpha_p (eV)^{1/2}} = 1.22 \frac{\lambda}{\alpha_p}, \quad (9)$$

where d_p is the diameter of the electron probe, d_g is the size of the Gaussian image, d_d is the diffraction limit, d_s is the size of spherical aberrations, d_c is the size of chromatic aberrations, α_p is the angle of convergence of the electron beam in the image area, λ is the electron wavelength, eV is the electron beam energy in eV, $\Delta(eV)$ is the spread of values of electron energies.

The method of determining d_p as a root-mean-square value (formula (6)), however, is subject to criticism.

A more precise expression is given in [23]:

$$d_p^2 = \left[\left\{ d_s^{1.3} + \left((d_d^4 + d_c^4)^{1/4} \right)^{1.3} \right\}^{1/1.3} \right]^2 + d_c^2, \quad (11)$$

where d_p is the diameter of the electron probe containing 50% of the current (FW50), and the quantities d_g , d_d , d_s , d_c are the FW50 values for the images of the source, diffraction disk, spherical aberration disk, and chromatic aberration disk, respectively, calculated using formulas (7)–(10).

According to studies [24, 25], the size of the electron probe can be estimated by plotting graphs of the dependence of d_d , d_s , d_c and d_g on α_p , the final convergence angle. The MC resolution using this method is equal to the maximum value of d_d , when its graph intersects the lines d_s , d_c or d_g (increased source size). Fig. 3 shows an example of MC resolution estimation [25].

Fig. 3. An example of graphical definition of the MC resolution [25].

At an energy of 2.5 keV, this MC is limited by chromatic aberrations and, at an optimal convergence angle of 4 mrad, has a calculated resolution value of 3.8 nm. According to the authors' estimates [25], for MCs with energies less than 2.5 keV, chromatic aberration always prevails over spherical one.

The size of the Gaussian image is determined by the size of the virtual source and the magnification of the MC. To decrease d_g , the magnification can be reduced, but this leads to a reduction in WD and an increase in α_p , which leads to an increase in spherical aberrations. From the experience of creating MCs, it follows that the optimal magnification in the system is close to 1 [17].

1.3 Principles and methods of modeling microcolumns

The relationships given in the previous paragraph show that it is impossible to simultaneously obtain a small ($\ll 1$) magnification, high brightness, and the minimum size of the electron probe. It is necessary to seek a compromise between the MC parameters, which leads to the need for modeling.

Modeling is performed to one degree or another by all MC developers to determine the current and calculate the EOS parameters that allow achieving the required MC characteristics.

In this case, the main tasks are:

1. Construction of the distribution of potential (and electric field) in the computational domain.
2. Calculation of electron trajectories.
3. Estimation of the influence of the space charge in the electron beam on the distribution of the electric field.
4. Estimation of the influence of elastic and inelastic interactions of electrons in the beam on electron trajectories.

Construction of the potential distribution

The electric potential is constructed by solving the Laplace equation for regions free of space charge:

$$\nabla^2 V = 0, \quad (12)$$

where V is the electric potential. Although the assumption of a charge-free region of the model space is not strictly true due to the presence of the beam itself, the magnitude of the beam current is usually such that expression (12) can be considered correct for lens design purposes.

When constructing the electric potential, one of the following methods is predominantly used: the finite difference method (FDM), the finite element method (FEM), or the boundary element method (BEM). The FDM and FEM involve dividing the electric field distribution area into elementary cells and constructing the electric field by spatial interpolation of the values obtained at discrete points of a regular FDM grid or a grid obtained by the triangulation method (FEM). The disadvantage of these methods is the need for a large number of grid elements to accurately represent irregularly shaped electrodes and to cover the entire computational domain. The FEM and BEM methods are

implemented in the SIMION, MEBS, LENSYS [26, 27], and COMSOL Multiphysics [28] software packages.

The BEM method is based on the idea of calculating the charge density distribution corresponding to the voltages applied to the electrodes and then calculating the potential distribution in space created by this charge distribution [29]. The advantage of BEM is that it does not depend on the discretization of space inside the solution domain, so interpolation of the field solution between discrete spatial points is not required. Thus, a detailed mesh in BEM simulation is only needed on the surface of the electrodes, which simplifies the simulation and increases its accuracy. This method has proven itself in modeling electrodes of arbitrary shape.

Calculation of electron trajectories

To construct electron trajectories, the equations of motion of charged particles under the action of electric field forces are integrated. The trajectories of charged particles are calculated by integrating a system of Newtonian equations.

The electrostatic forces must be calculated based on the current position and velocity of the particles. These forces are then used to calculate the current particle acceleration, which, in turn, is used in numerical integration methods to predict the position and velocity of the particle at the next time step. The SIMION package, for example, uses a heavily modified fourth-order Runge–Kutta method, which is a popular computational method for solving higher-order differential equations.

Assessing the influence of space charge and interaction of electrons in the beam

The problem of electron beam expansion due to the presence of space charge (the Bersch effect) occurs in areas with the highest current density, i.e., in crossovers (beam focusing areas) [30]. The Bersch effect is a phenomenon in which the scattering of electrons by energy increases as the current of electrons emitted by the electron gun increases, due to the Coulomb interactions between electrons. With an increase in the spread of the electron energy, the chromatic aberration of the electron lens increases. As a result, the spread of the electron beam in the direction perpendicular to the direction of movement of the electron beam increases, and the spatial resolution of the electron microscope decreases. In [26], an estimate of the parameters for which the presence of a space charge can be neglected is performed, and it is shown that in a 3 mm long MC, with a beam convergence angle of $\alpha_p = 1$ mrad, at a current of 1 nA, the charge can be neglected if the beam energy is greater than 1 keV.

An estimate of the influence of elastic and inelastic scattering of electrons in the beam due to their interac-

tion, as well as interaction with the surface of the sample, is performed using the Monte-Carlo statistical analysis method [31].

1.4. Practical aspects of microcolumn modeling

When designing a MC, it makes sense to pay attention to the following: when performing both calculations and modeling, it is often convenient to consider that the zero potential is at the cathode, where the electron velocity is zero, and the anode has a high positive potential. However, from the point of view of practical implementation and safety of work with the device, it is advisable to have a strong negative voltage on the cathode and a grounded anode. Then the sample and the extreme electrodes of the OL will also be grounded [30].

Modeling the MC as a single system is complicated by the fact that the emitter apex has a submicron size (usually the radius of curvature is < 100 nm), and the length of the MC is several mm. Modeling is usually performed by dividing the MC into several subsystems. In this case, the boundaries of the subsystems are areas free from the electric field [32].

To determine the emitter current, a full-size tip is modeled. Usually, the model includes the tip of the probe with a given radius of curvature and an extractor electrode, which allows calculating the electric field. It has been shown [33] that if the extractor aperture is small, the field of the next electrode in the column does not penetrate into the region between the probe and the extractor and does not affect the emission current. The emission current is calculated in accordance with the Fowler–Nordheim theory [34]. Many researchers point to good agreement between theory and experiment [35–37].

Since in most studies the distance from the emitter to the first aperture (extractor) is large (more than $5 \mu\text{m}$) compared to the radius of curvature of the probe (usually less than 100 nm), the region at the input of the first aperture of the system (extractor) can be considered free of the electric field. The electron beam is directed into the lens in such a way that the electron trajectories originate from a virtual source located at a small distance behind the physical tip of the probe [32, 38]. Thus, there is no need to include a field emission probe in the electrode sequence. Instead, the model assumes that electrons originate in a region corresponding to the position and size of the virtual source and propagate rectilinearly with given kinetic energies and divergence angles toward the lens.

The coefficients of spherical and chromatic aberrations C_s , C_c are given by integral expressions [6], which are difficult to solve analytically but are easily calculated computationally. The SIMION and LENSYS software packages calculate the focal parameters of lenses and aberration coefficients automatically [27].

As an alternative to software determination of aberration coefficients, it is proposed in [26, 39] to perform post-processing of electron trajectory graphs and measure the minimum beam thickness in the focusing region (disk of least confusion) of the D_{LC} (Fig. 4).

Fig. 4. Close-up of the focusing region. The marked z -positions Z_M , Z_{LC} and Z_P refer to the marginal beam image, the plane of smallest beam thickness, and the paraxial beam image, respectively; R_{LC} denotes the minimum beam radius

If the electron source in the model is point-like, then the width of this disk is equal to the value of spherical aberrations d_s with sufficient accuracy of calculations. Then, using formula (8), we can determine the coefficient of spherical aberrations C_s . Here the paraxial ray is the ray having the minimum angle with the direction of the optical axis Z , and the marginal ray is the ray having the maximum angle with respect to the axis Z .

The degree of chromatic aberration can also be estimated using direct ray tracing, following two sets of rays emanating from a point source, identical in number and angles relative to the optical axis, but separated in energy by ΔeV [26].

Note that when comparing the size of the electron probe obtained by modeling in different studies, it is necessary to pay attention to the method of estimation. Based on the fact that the beam has a Gaussian shape, its size is often estimated as the width of the peak of the beam cross section at its half-maximum (FWHM) [40]. In other cases, based on the fact that the shape of the electron distribution in the beam in the focusing region may differ from Gaussian [39], the width of the beam is estimated as the width of the cross-section through which 50% of the electron current passes (FW50) [17, 23].

Design parameters affecting the MC resolution

The main factors affecting the width of the electron probe are: lens apertures, distances between lenses, focusing voltage, and voltages on a single lens. Below are presented the results of some numerical studies of the dependence of the width of the electron probe d_p on various factors.

In [41], it was shown that an increase in the aperture of the OL reduces d_p , and with an increase in WD d_p increases.

In [17], B-type MC was simulated, and it was shown that the size d_p decreases with increasing accelerating voltage and does not depend much on the distance between the emitter and extractor.

In [42], the results of simulating 2-, 3-, 4-, and 5-electrode lenses in SIMION are presented. A complete set of focal properties of the lenses was obtained de-

pending on the voltage ratio on the electrodes. The result is presented in normalized form, which allows the calculations to be used to construct models on various scales. In [27], the calculations were continued, and for a similar set of lenses, graphs of the aberration coefficients were presented depending on the voltage ratio on the lens electrodes.

In [39], the influence of geometric parameters on focal points, magnification, and aberration coefficients is discussed. A comparative analysis of MCs with aperture and cylindrical lenses is carried out. It has been shown that, although cylindrical lenses are generally not significantly superior to aperture lenses, they are capable of operating in much wider energy ranges, and due to their greater compactness and simplicity, they may be of great interest in the practical development of MCs.

It should be noted that in practice, the size of the electron probe often exceeds the result obtained in modeling, which may be due to the following factors [17]:

- simplifications adopted when setting the lens parameters in modeling;
- inaccurate determination of the distance between the emitter and the extractor;
- the presence of unaccounted space charge;
- non-ideal shape of the electrode holes;
- non-ideal alignment of the elements in the column.

2. PRACTICAL IMPLEMENTATION OF MICROCOLUMNS. MICROCOLUMN DESIGN PRESENTED IN LITERARY SOURCES

Stages of MC development

A powerful factor stimulating the development of MEOS was the work in the field of STM that appeared in the mid-80s and the awarding of the Nobel Prize in Physics in 1986 to Ernst Ruske (for the invention of the electron microscope) and Gerd Binnig and Heinrich Rohrer (for the invention of the scanning tunnel microscope). MC developers immediately adopted the precision piezoelectric motors used in STM and the principle of stabilizing the electron current using negative feedback.

The paper [5] presents one of the first MCs brought to implementation, consisting of only one electrode providing a beam energy of 15 eV. At this voltage, the ultra-sharp tungsten probe (W111), manufactured using the technology proposed by the authors, operates in the field emission mode, providing a current of 1 nA. Scanning of the sample is performed using an STM piezo scanner with an unfocused electron beam. Lateral resolution of about 3 nm is ensured due to the small distance to the sample.

(Scheme B). STM technologies have been used to varying degrees by other authors ([9, 43]).

The most common model is an MC with an objective lens (A-type MC), shown in Fig. 2, a. For known developments of MCs of this type, the work [8] is basic. In this work, a MC with an electron energy of 1 keV and an objective lens in the form of a symmetric OL is presented. The electron source lenses consist of an extractor, a focusing electrode, and an anode with aperture sizes of 5, 100, and 2.5 μm , respectively. The radius of curvature of the probe is 0.1 μm , the distance from the probe to the extractor is 50–100 μm . The diameter of the objective aperture (OL) is 200 μm , and the distance between the objectives is 250 μm . The objective, operating at a working distance of 1 mm in the acceleration mode, has, according to the calculation, the chromatic and spherical aberration coefficients of approximately 2 and 50 mm, respectively. It is shown that a probe size of 9.9 nm can be achieved at an optimal convergence half-angle of 6.3 mrad. The probe current is 1 nA. A miniature Schottky emitter and a cold field emission cathode in the form of a W(111) needle treated with oxygen were tested. The work presents an image of an aluminum grating obtained in the scanning transmission electron microscope mode using a Schottky emitter at $T = 1800$ K and a vacuum value of 5×10^{-11} – 1×10^{-10} Torr. The image area is about $15 \times 15 \mu\text{m}$, due to magnification, details of 10 nm in size are distinguishable in it.

The assembly of the microlenses and the objective lens was performed by anodic bonding of silicon layers and heat-resistant gaskets. Optical adjustment of the lenses in the column is performed with an accuracy of 1 μm .

The smallest A-type MC is presented in [43], where a design of MC consisting of a probe, anode, and a single lens is proposed. MC consists of metal electrodes with apertures of 0.3–1.5 μm in size, "drilled" using a focused ion beam, separated by an insulating material. Due to its miniature size, this column has minimal aberrations. The working distance in such a system is 5 μm . Acceleration voltage is 300–500 V. The distance from the emitter to the anode is 500 nm. In order to perform scanning, the authors propose using STM piezoelectric motors. The authors declare that with the help of the miniature design they developed, it is possible to obtain images of a single protein and DNA molecule, but they do not provide experimental results.

An interesting concept of a MEMS-type MC with an energy of 2 to 15 keV integrated on a single crystal was proposed in [44]. The MC is a multilayer structure made of silicon and glass, and containing an electron gun, a single lens and an anode in the form of a silicon chip with a thin membrane. The MC is rigidly connected to a vacuum micropump and a microchamber for samples. The electron gun consists of

a field emission cathode based on carbon nanotubes (CNT). All electrodes were separated and adjusted using a special polymer holder, which was manufactured by 3D printing. Electron field emission was obtained, and the first measurements of the focusing capabilities of the OL manufactured on a silicon substrate were carried out. At a cathode-to-gate distance of 1.1 mm, the threshold voltage of electron emission was about 1100 V. The size of the electron probe was 0.163×0.163 mm. A characteristic feature of the described development is lenses with a rectangular aperture [45]. The rectangular shape of the aperture of electrostatic lenses was analyzed earlier in [46], where the advantages of the rectangular shape in comparison with the conventional round shape were shown by means of modeling.

In [47], the MC developed by the authors is supplemented with a deflection system, and the obtained electron microscopic images are presented (Fig. 5).

Fig. 5. The scanning area of the developed MC with a deflection system depending on the electron beam energy [47]. a — 2 keV, б — 3 keV, в — 5 keV; the working distance is 5 mm; the diameter of the electron beam is 5 μm

The presence of an objective lens in the MC design is a significant limitation for increasing the scanning area. Due to the short focal length inherent in all MEOS, increasing the area requires large deflection angles of the electron beam from the optical axis of the MC, which, in turn, leads to large aberrations and distortions at the edges of the overview images. To solve this problem, it was proposed in [48–50] to move the optical axis of the MC synchronously with the deflecting electron beam, i.e., to deflect the OL simultaneously with the beam. Due to the small size and weight of the objective lens in the MEOS, the implementation of such precision mechanical scanning does not present a particular problem, in contrast to scanning with an objective lens in the electron column of a standard microscope with large dimensions and weight.

A similar approach was demonstrated in [51], where it was shown by means of modeling that the use of OLs which apertures track the position of the electron beam center by shifting them perpendicular to the optical axis of the system allows for a reduction in aberrations. An alternative solution could be the use of OLs with elliptical apertures [51].

However, despite the fact that the described improvements in principle allow for a significant reduction in MC aberrations, they still somewhat complicate their practical implementation. Therefore, many developers have taken the path of simplifying the de-

sign and have developed MCs without an objective lens. Such developments are described below.

B-type MC designs

Since A-type MCs contain an OL, their manufacture is complicated by the need to combine and adjust the electron gun, deflection system, and objective lens along one optical axis. It is obvious that the MC of B-type, where the OL is completely absent, is a simpler technical task. From the very first developments, MCs were intended for both SEM and electron lithography, including multi-beam. The main obstacle to performing scanning or lithography over a large area using A-type MC is the limitation imposed by the aperture of the objective lens. In order to overcome this limitation, MCs without an objective lens (MC B-type) were proposed.

A successful example of such a development is the MC (Fig. 6), proposed in works [13, 14], where the extraction, acceleration, and focusing of the electron beam are performed using only 2 microlenses created on the basis of silicon wafers.

Fig. 6. Schematic diagram of a MC consisting of an emitter and a microlens [14].

The source of electrons is a W-needle, to which a negative bias of 300 V is applied, located at a distance of 1–2 mm from the first electrode-injector with an aperture diameter of 1 μm . The emission current is $\sim 1 \mu\text{A}$. The article, however, says nothing about the size, structure, and value of the work function of the probe. A negative voltage from 150 to 250 V is applied to the second electrode, called the focusing one, by changing it, it is possible to adjust the size of the focal spot. At an optimal focusing voltage of 175 V and a working distance of 1.3 mm, the spatial resolution is 30 nm. The location of the electron source at a large distance from the electrodes eliminates the need for precise alignment of the probe position and the center of the injector aperture, which is an important advantage of such a MC. This MC concept can be extended to microelectronic lithography devices at a submicron resolution, which has been demonstrated experimentally. Using the presented MEOS, electron lithography was performed with a low-energy beam of 310 eV, and a periodic structure of parallel lines with a line width of $\sim 200 \text{ nm}$ was created on an area of $(6 \times 6) \mu\text{m}^2$ [14].

In the work [18], 2 types of MCs are presented: with and without an objective lens (MC of types A and B, shown in Fig. 7 on the left and right, respectively) and their operation is demonstrated (Fig. 8) when scanning samples over a large area.

Fig. 7. Microcolumn design developed to provide a larger field of view [18].

a — A-type microcolumn with an Einzel objective lens, equipped with a split deflection system; б — Type B microcolumn without an objective lens

Fig. 8. Images of test objects obtained in [18].

a — image of the maximum area, $40 \times 40 \text{ mm}$, obtained using a MC without objective lenses (B-type MC) at an electron beam energy of 150 eV and a working distance of 100 mm; б — fragment of $15 \times 15 \text{ mm}$, taken from a survey image of $168 \times 168 \text{ mm}$, obtained using a MC type A with an objective lens and a distributed deflection system at an electron beam energy of 300 eV and a working distance of 195 mm

Using B-type MC (Fig. 8, a) without objective lenses, a scanning field of 40 by 40 mm was achieved, on which lines with a thickness of 20 μm are clearly distinguishable. It was shown that the maximum scanning area is proportional to the working distance and inversely proportional to the energy of the electron beam. It is shown in the work (Fig. 8, б) that A-type MC but with a deflection system divided into two parts, lets us obtain a very large field of view (170 mm by 170 mm), if the objective source and the OL are correctly adjusted. The authors believe that any of the schemes shown in Fig. 7, can be used in the development of inspection equipment with a large field of view based on low-energy MCs.

In continuation of the work on improving the MC design, the authors proposed to supplement the traditional system of source lenses with a focusing lens [33]. The set of source lenses in the proposed model consists of four electrodes: extractor S1, focusing electrode S2F, accelerator S2 and electrode with limiting aperture S3 (Fig. 9, a). The diameters of the apertures of the three electrodes are 50 μm , with the exception of the limiting aperture, the diameter of which is 2.5 μm . A negative voltage of 1000 V and 700 V, respectively, is applied to the cathode and focusing electrode, and electrodes S2 and S3 are grounded.

Fig. 9. Improved design of the MC [33].

a — microcolumn without single lenses with an improved source lens system (microlens) and a silicon deflector; б — diagram of a modified silicon deflector

The distance from the cathode to the extractor is 50 μm . In the work [52], the authors showed using modeling that applying the proposed system of source lenses in a B-type MC makes it possible to obtain

a beam size at the output of the deflection system of no more than 5 nm at an energy of 1 keV and a working distance from the deflector output to the sample equal to 1 mm.

Based on these calculations, a B-type MC was created and tested [53], the peculiarity of which is the same aperture diameter for lenses S1, S2, S2F (50 μm), which simplifies manufacturing and adjustment. The limiting aperture S3 is grounded and has a size of 2.5 μm . In [53], an original Si deflector was proposed (Fig. 9, b) and the effect of the deflector electrode size on the scanning area and the size of the electron probe was studied. By modeling in the commercial Opera 3D program, it was found that when using wide (60°) deflector electrodes, the scanning area increases almost twice, while some deterioration in resolution is observed, which, however, does not exceed 18 nm even with an area of 150 μm^2 . It was shown experimentally that the proposed Si deflector, when using wide electrodes, allows scanning over an area larger than when using a standard deflector, with the same deflection voltage (Fig. 10).

Fig. 10. Sample images of copper grid cells obtained using MC, modified Si deflectors, and standard deflectors with the same deflection voltage of 100 V [53].
The emitter voltage is fixed at 400 V. The deflection voltage is applied: a — to the smaller (30°) electrodes, b — to the larger (60°) electrodes of the Si deflector, b — to the four electrodes of the standard deflector

Calculations given in [40] show that in a B-type MC, which has a source with three electrodes, a beam with an energy of no more than 1 keV can be focused into a spot with a size of no more than 15 nm with a working distance of about 50 μm .

Correction of aberrations in MCs

Traditionally, all MC developers try to reduce the size of the electron probe by optimizing the design and voltages on the electrodes. The use of aberration correctors in MCs is difficult due to the complexity of their miniaturization. The principle underlying the aberration corrector is to create a concave lens that disperses off-axis rays so that they reconverge to a point rather than a disk in the plane of the Gaussian image [54].

In [55, 56], a thin metal film sandwiched between two electrodes was proposed as a corrector for both spherical and chromatic MC aberrations. It was shown by modeling that if electrons pass through the film with energy close to zero and the film has sufficient transparency for electrons, the spherical aberration coefficients at a short distance from the film are nega-

tive (Fig. 11). In addition, the film in such a system serves as a monochromator, since it does not transmit electrons with an energy lower than the film work function. The calculation results presented in [56, 57] show that the width of the electron probe in the MC with an electron energy of 1 keV when using an aberration corrector in the form of a thin (20 nm) gold film can be only 2 nm, the working distance is 15 μm , and the length of the entire MC is 215 μm . The authors believe that such aberration correction can be used in the creation of multi-beam MEOS for diagnostics of semiconductor structures.

Fig. 11. The magnitude of the spherical aberration coefficient C_s , calculated by integration as a function of z .
The top part shows a diagram of the column and a paraxial ray starting from the position of the object [57]

3. ELECTRON SOURCES USED IN MCs

The success of constructing a MC is largely dependent on the quality of the electron source.

Due to the small geometric dimensions of the MC, there is usually no intermediate crossover in it, and the image defining the disk of the electron probe is directly the image of the virtual source. Again, due to the small dimensions, the magnification factor in the MC is usually of the order of unity. Thus, the size of the virtual source makes a significant contribution to the MC resolution.

Another significant factor affecting the quality of low-voltage MCs is the magnitude of the electron energy spread, since chromatic aberrations are proportional to the ratio $\Delta(eV) / (eV)$, where $\Delta(eV)$ is the spread of kinetic energies, and eV is the electron beam energy. The lower the beam energy in the MC, the greater the contribution to the chromatic aberration value made by $\Delta(eV)$.

As already mentioned, the "reduced" (normalized) brightness β_r is usually used to characterize the electron source, the value of which, in the absence of electron interaction, remains unchanged during the beam passage in the column and serves as a characteristic of the current value in the electron probe [20]. The normalized brightness β_r is the only truly invariant property of the electron radiation source. It does not depend on the focusing properties or MC aberrations, but its value decreases due to the Bersch effect.

An important factor characterizing the source is spatial coherence, which is proportional to the size of the source. Ideally, all electrons should emerge from

one point. However, in reality, the smaller the size of the source, the less stable it is [58].

Thus, the main characteristics that determine the quality of an electron source are:

- virtual size;
- brightness, "reduced" (normalized) brightness;
- the magnitude of the energy spread;
- spatial coherence.

Different types of sources are used in MC:

- cold field emission [5, 8, 59];
- Schottky cathodes [8];
- carbon nanotube (CNT) cathodes [53, 60, 61];
- graphene cathodes [62];
- tunnel (MDM) [63];
- laser photoemission [40].

W-needles, sharpened by electrochemical etching of polycrystalline W-wire, are usually used as field emission cathodes. It is known that at the top of a sharp needle made of polycrystalline wire, as a rule, a crystalline grain with a crystallographic direction $\langle 100 \rangle$ oriented along the wire axis is localized. Therefore, at the top of such a needle, as a rule, there is a flat nanometer section oriented perpendicular to its axis. However, if the needle is made from a crystalline blank which long axis coincides with the crystallographic direction $\langle 111 \rangle$, then its apex will end in an acute triangular angle, which brings such an emitter closer to an ideal point source. The radius of curvature of the tip to obtain a field emission current in the MC should be less than 100 nm. In [5], a cold field source exploiting a tungsten probe (W111) is proposed, the source is formed so that emission occurs from a group of several atoms at the tip of the needle. Electrons tunneling through a triangular potential barrier in the case of cold field cathodes have a small energy spread of $\Delta E \sim 0.5$ eV, which is especially important for low-voltage systems, to which the MC belongs, due to the dependence of the magnitude of chromatic aberrations on ΔE .

The field emission cathode has very attractive characteristics: small size, high brightness, small spread of electron energy. However, the smaller the probe radius, the less stable in general is the field emission current, which depends on the cleanliness of the cathode surface and the vacuum level. Low stability of the field emission current and increased requirements for vacuum ($p < 10^{-9}$ Torr) limit the use of cold field emission cathodes in MEOS for electron microscopy and lithography.

A Schottky cathode is a thermal field emission cathode, also a needle made of W-wire or a crystalline blank with a long axis coinciding with the crystallographic direction $\langle 100 \rangle$. At the tips of such needles there is a platform measuring $\sim 10 \times 10$ nm, which is coated with a ZrO film. This reduces the surface work function, and when heated to 1800–1900 °C, such a cathode operates in the thermal field emission mode

[38]. Despite the fact that a cold field emitter is better than a Schottky cathode in terms of source size and electron energy spread, in practice a thermal field emission Schottky cathode is most often used due to its higher stability and resistance.

A promising solution to the problems of field emission cathodes may be a graphene-coated nickel point cathode [62]. This source is also a cold field emission cathode. Experiments show that it provides stable electron emission with relatively large tip sizes, can operate at pressures $p > 10^{-8}$ Torr, and has an ultra-low work function of 1.10 ± 0.07 eV. Such a cathode has a calculated value of the normalized "reduced" brightness of $1.46 \times 10^9 \text{ Am}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{B}^{-1}$ for a tip radius of 170 nm, and the measured energy spread is 0.246–0.420 eV for a range of tip radii of 260–500 nm, which is comparable with the standard characteristics of cold field-emission cathodes.

Also quite actively developing is the direction in which carbon nanotubes (CNTs) are used as electron emitters for MCs. The authors of the work [61] compared a standard field-emission W-cathode with a 2D distributed cathode based on CNTs during their operation in MCs with the same design and an aperture diameter of 100 μm . It was found that at an electron beam energy of less than 600 eV, the current of the CNT emitter was three orders of magnitude higher than the current of the W-probe and was about 100 mA. The authors also note that, due to the extended size of the CNT-based cathode, the alignment of such a source relative to the MC apertures is much simpler than when using a standard W-emitter. In [53], images obtained using a MC with a 2D distributed CNT-based cathode are shown.

In [64], an electron source was a W-needle with a radius of ~ 100 nm, brought close to a distance Z to a flat injector with a round aperture and a single electrostatic microlens. The field emission mode was modeled through a triangular potential barrier, taking into account the image forces at a voltage V from 10 to 120 V. The electric field strength required for field emission was achieved by precisely bringing the W-needle closer to the flat injector at distances from 10 to 500 nm. The STM technique was used to bring the emission current closer and stabilize it. A stable current of $I = 0.5 \times 10^{-9}$ A was obtained experimentally without preheating the W-needle, and the $Z(I)$ dependences were measured, they coincided with the calculated data, given that the work function was ~ 1.2 eV.

Fig. 12. Schematic diagram of an electron source based on a metal-dielectric-metal tunnel contact [63] (a) and a diagram of a laser photoemission cathode [40] (b).

In [63], an original concept of an electron source based on a metal-dielectric-metal tunnel contact using a tungsten probe coated with a tungsten oxide layer and a thin (~ 20 nm) gold film is proposed (Fig. 12, a).

The advantage of this source is a fairly simple manufacturing method, low emission voltage (units of volts), and no special requirements for vacuum. It is assumed that such a source has high brightness, and the beam of tunneling electrons has high monochromaticity due to the need to overcome the energy barrier equal to the work function of the gold film. The experimentally obtained emission current is tens of pA. However, a significant problem is the low stability of the emission current.

Finally, the paper [40] discusses the use of laser photoemission cathodes in MCs, these cathodes can have characteristics similar to field cathodes: a size of 10×10 nm, an energy spread of $\Delta E \sim (0.1-0.2)$ eV. As the authors note, the advantages of photoemission cathodes are high radiation brightness, low energy dissipation, low emission voltage, and ease of optical control without the use of shielding beams. These features make it possible to significantly simplify the design of microcolumns and increase their compactness.

4. TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING MICROCOLUMNS

A wide variety of technologies are used in the manufacture of MCs, including precision machining, group silicon microelectronics technology, focused electron and ion beam technology, optical and electron lithography. Of course, a detailed discussion of all the technological nuances of MEOS manufacturing requires a separate special review, so here we will only briefly present some works.

In work [44], a technology for creating multilayer structures from silicon and glass based on precision machining and optical alignment is discussed.

In work [11], laser micromachining was used in the manufacture of MCs. Using a laser, holes with a diameter of about $20 \mu\text{m}$ were drilled simultaneously in 5 layers of metal and silicon. The measured total displacement of the hole centers did not exceed $1 \mu\text{m}$. Images of apertures made by laser drilling show that roughness of the metal is formed at their edges, which leads to an uneven distribution of the electric field. The smaller the size of the MC apertures, the more complex the technology of assembly and adjustment of elements along the optical axis of the MC. Inaccurate alignment of aperture centers leads to a sharp increase in geometric aberrations, which is shown by modeling [11, 40].

The most promising method from the point of view of the highest, submicron, accuracy of alignment of holes in electrodes is the method based on milling

a lens hole with an ion beam through a sandwich consisting of several conducting layers separated by thin insulators [65] (Fig. 13). However, it is not without drawbacks. The use of this method is associated with the formation of a conical structure of holes [66], where the angle of inclination of the walls strongly depends on the thickness of the milled layer. In addition, this method is limited by the thickness of the electrodes and non-conductive spacers at the level of a few micrometers. Also, lenses created by this method are often susceptible to charging effects. To avoid charging, the hole in the spacer must be much larger than the holes in the electrodes.

Fig. 13. Microcolumn fabrication procedure.

Material legend: 1 — gold, 2 — polyamide film, 3 — silicon nitride, 4 — palladium, 5 — aluminum oxide; a — three silicon chips are stacked to fabricate an Einzel lens; б — the holes of the Einzel lens are milled using a focused gallium ion beam; в — the holes are coated with gold evaporation to cover the silicon nitride exposed during milling; г — a stack of microlenses is attached to the Einzel lens; д — the apertures of the microlenses are milled through the holes of the Einzel lens

In most MCs, the basis for their creation is Si wafers and the technology of their processing developed in microelectronics. In works [9–11, 13, 14, 17, 36, 37, 65–73], MCs manufactured using silicon wafer processing technologies are described. [25, 70] describes a technology for creating MCs consisting of multilayer sandwiches in the form of silicon wafers, thin dielectric and conductive layers requiring precision alignment of apertures in the source lenses, deflector and in the OL, using group methods of microelectronics.

An important stage in the manufacture of MCs is the precision mechanical alignment of individual elements. One of the methods for performing optical alignment is the analysis of the laser diffraction pattern described in [35, 71].

An original example of a miniature EOS is the electron holography device [72], the creation of which was started with the developments described in [5]. The electron holography setup (Fig. 14) has a point source of electrons W(111) and only one extractor electrode. At a distance of less than 1 micron from the plane in which the object is placed, part of the coherent electron wave is scattered by ferritin attached to a carbon nanotube (insert), forming a wave emanating from the object. On the screen of the detector, located at a distance of 68 mm, an interference pattern of the far field between the object and the reference wave is recorded — a hologram, on the basis of which a numerical reconstruction of the protein is performed.

Fig. 14. Operating principle of the electron holography setup (a) and the reconstructed image of the electron hologram with a kinetic energy of 53 eV, consisting of several ferritin molecules attached to a bundle of carbon nanotubes (b) [72].

CONCLUSION

Low-voltage miniaturized electron-optical systems, which are also called microcolumns, represent an independent direction in the field of electron optics and are the basis of low-voltage miniature electron microscopes, multi-column lithographs and electron holography systems.

This direction appeared in the 80s of the twentieth century in connection with the formation of an accessible technological base for the creation and assembly of miniature electron lenses; it was also stimulated by the emergence of scanning probe microscopy with its precision movement systems based on piezo actuators and tracking systems for current stabilization. Interest in low-voltage MEOS is associated with the fundamental principle of reducing aberrations with a simultaneous decrease in the size and stresses in electron-optical systems, a non-destructive effect on the sample, increased image contrast due to the penetration of low-energy electrons only into the surface layers of the sample, and the possibility of studying poorly conducting samples without additional application of conductive coatings. Particular hopes are associated with multi-column systems on a chip for high-performance multi-beam lithography, as well as systems for inspection of large wafers. The existence and availability of various software packages for electron-optical calculations and the development of group microelectronics technologies, focused electron and ion beam technologies, laser technologies, and precision 3D printing technologies make it possible to model and create MEOS of virtually any configuration with apertures of any size, down to submicron. When creating the MC, original solutions were found, for example, for an aberration corrector and a monochromator based on a nanometer-thick metal film, an electron source based on a local tunnel contact "metal-dielectric-metal". The main disadvantage of the MEOS is the short focal length, which is the reason for the small size of the survey frame. This is due to an increase in aberration when the beam deviates from the optical axis, which imposes a limitation on the deviation angle and, as a consequence, leads to a decrease in the area of the survey frame. But this problem can be solved by synchronously deviating the opt-

ical axis simultaneously with the deviation of the electron beam.

Considering the small size and light weight of the MEOS, this is not difficult to implement in practice, in contrast to large and heavy electron-optical systems, for example, using piezoelectric engines.

Fig. 15. Electron microscope 8500 FE-SEM.
a — image of a section of the 8500 FE-SEM column;
б — toner particles (a mixture of carbon and polymer), obtained without applying a conductive coating;
в — a membrane separator of the Celgard 2325 lithium-ion battery, obtained without applying a conductive coating
(https://www.unittest.com/meas_eq/agilent/8500_fesem.html)

Considering the lower cost of the MC compared to large electron-optical systems and all the above-mentioned advantages of MEOS, as well as the possibility of a significant increase in the productivity of electron lithography in the case of using multi-column systems, it would seem that after so many years of effective research, one should expect the appearance of industrial batches of devices based on MEOS. However, this is far from reality. We know of only two devices based on electrostatic MCs that have been introduced to the electron microscope market — the 8500 FE-SEM and Voxa's MOCHII. The 8500 FE-SEM microscope (Fig. 15, a) was created based on the works of Chang Kretchmer, Muray [4, 68, 69] by a large company Agilent. The device is equipped with a heated Schottky field cathode, and its MC is manufactured using silicon technologies. The instrument operates in the voltage range from 500 V to 2 kV and has a spatial resolution of less than 10 nm at 1 kV. Agilent has discontinued production of the 8500 FE-SEM, but we find it useful to provide detailed specifications below (see Appendix).

Fig. 15, б, в, shows examples of images obtained with the 8500 FE-SEM.

Voxa's MOCHII microscope was developed based on the MC proposed in [12] as part of a NASA program. It was initially adapted for research on the surface of the Moon and other planets in space [37, 58, 74–76]. The instrument can be carried in the hand (height 0.25 m, weight less than 12 kg), it has low power consumption (less than 80 W), a convenient built-in wireless tablet interface, and multi-user remote control capabilities. This microscope has a built-in metal vaporizer for *in-situ* sample preparation and an energy-dispersive X-ray spectrometer, and for obvious reasons it lacks an air pumping system. The study of geological and other natural materials using MOCHII is carried out in such a way that the samples remain intact. Consequently, the sample can be ana-

lyzed multiple times, which will provide a more complete picture of the sample's origin and possible evolution (Fig. 16, a).

Although Voxa's MOCHII microscope has been tested in space (Fig. 16, b), it is apparently still a prototype.

Fig. 16. MOCHII electron microscope.

a — crane fly larvae

(<https://www.voxa.co/solutions/mochii>);

б — image of carbon inclusions in the ALH84001 grain sample obtained using the MOCHII SEM directly on the orbital station in 2022 [76]

We believe that in the case of MEOS, a vicious circle effect is at work. Indeed, for the industrial and cost-effective production of fundamentally new devices, on the one hand, it is necessary to arouse the

interest of scientists and engineers by demonstrating the solution of a number of new urgent problems that cannot be solved using existing devices, and on the other hand, until such devices are manufactured in sufficient quantities, there will be no examples demonstrating their relevance. Let us also recall that the Nobel Committee back in 1986 combined the electron and scanning probe microscopes, awarding a joint prize in physics for their invention. At present, there are solutions for combining SPM with EM, increasing the information content of the study, while SPM acts as an additional option to SEM [77, 78]. We think that all the prerequisites for combining SPM and an electron microscope based on MC by creating a single device with a single analytical unit and single hardware and software are in place. Perhaps this is one of the ways to practically use the results obtained in the field of MEOS research.