

УДК 621.385.833.28:537.533.35

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА В РЭМ ПО ЗАВИСИМОСТИ КОНТРАСТА СИГНАЛА ОТ ПОТЕНЦИАЛА ФОКУСИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА

© 2020 г. В. В. Казьмирук^{а, *}, И. Г. Курганов^{а, **},
А. А. Подкопаев^а, Т. Н. Савицкая^{а, ***}

^аИнститут проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,
Черноголовка, 142432 Россия

*e-mail: kazmiruk@iptm.ru

**e-mail: kurganov@iptm.ru

***e-mail: savitskaja.tatiana@gmail.com

Поступила в редакцию 14.01.2020 г.

После доработки 20.02.2020 г.

Принята к публикации 25.02.2020 г.

В работе рассмотрен метод обработки сигналов в растровом электронном микроскопе, оборудованном дополнительным фокусирующим электродом. В основе метода лежит зависимость контраста сигнала от потенциала фокусирующего электрода. В свою очередь, зависимость контраста сигнала от высоты положения точки фокусировки относительно базовой поверхности образца позволяет установить однозначное соответствие: значение потенциала электрода–высота точки фокусировки пучка над поверхностью образца. Предлагаемый метод решает задачу определения плоскости точной фокусировки электронного пучка относительно микрорельефа образца и выставления этой плоскости на заданную высоту относительно базовой поверхности образца с повышенной точностью путем изменения потенциала фокусирующего электрода, позволяя при этом снизить время, необходимое для выполнения коррекции положения точки фокусировки пучка.

Ключевые слова: растровый электронный микроскоп, электронная оптика, электронно-оптическая система, фокусирующий электрод, магнитная линза, плоскость точной фокусировки, измерения параметров электронного пучка.

DOI: 10.31857/S1028096020090083

ВВЕДЕНИЕ

Необходимой составляющей процесса исследования поверхности объектов с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) являются процедуры определения и коррекции параметров электронного пучка, включающие его фокусировку и стигмирование. Чаще всего необходимость коррекции положения точки фокусировки электронного пучка обуславливается изменением высоты микрорельефа поверхности образца, происходящее как при переходе от одного поля сканирования к другому посредством перемещения стола объектов, так и при сканировании микроструктур с изменяющейся в широком диапазоне высотой профиля рельефа.

В работе [1] приведено краткое описание существующих способов определения и корректировки параметров сфокусированного электронного пучка. Эти способы [2–5] основаны на обработке изображений или сигналов РЭМ и направлены на решение задачи точной фокуси-

ровки электронного пучка, наилучшим образом обеспечивающей получение необходимой информации об исследуемом объекте. Положение точки точной фокусировки пучка определяется значением регулируемого параметра РЭМ. В качестве регулируемого параметра выступает ток возбуждения объективной линзы.

Методы реализации этих способов имеют два существенных недостатка. Первый из них состоит в том, что критерии, используемые для определения значения тока возбуждения объективной линзы, соответствующего точной фокусировке, не определяют положения плоскости точной фокусировки по отношению к базовой поверхности объекта. При этом положение плоскости точной фокусировки, задаваемое найденным значением тока возбуждения объективной линзы, зависит от характера микрорельефа поверхности исследуемого объекта, наличия и количества мелких деталей на ней. Кроме того, положение плоскости точной фокусировки при переходе с одного поля

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ ФОКУСИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОД

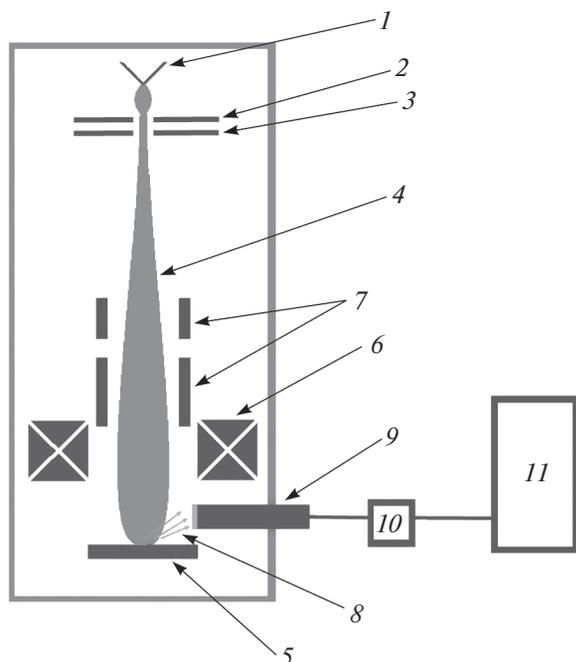


Рис. 1. Схематическое изображение электронно-оптической системы РЭМ с добавочным фокусирующим электродом 2, расположенным вблизи анода (3): 1 – катод; 4 – электронный пучок, сформированный системой катод–анод; 5 – образец; 6 – объективная линза, фокусирующая электронный пучок на образце; 7 – отклоняющая система; 8 – сигнал вторичных электронов; 9 – детектор вторичных электронов; 10 – аналогово-цифровой преобразователь; 11 – управляющий компьютер.

сканирования на другое может меняться в зависимости от рельефа неопределенным образом. Таким образом, отсутствует однозначная взаимосвязь между сигналом и точкой фокусировки электронного пучка.

Вторым недостатком является большая длительность соответствующих процедур фокусировки и коррекции астигматизма электронного пучка.

Мы предлагаем метод обработки вторично-эмиссионных сигналов, предусматривающий наличие в электронно-оптической системе РЭМ вспомогательного фокусирующего электрода. Метод решает задачу определения положения плоскости точной фокусировки электронного пучка и выставления этой плоскости на заданную высоту относительно базовой поверхности образца (подложки) с повышенной точностью, а также позволяет снизить время, необходимое для выполнения коррекции положения точки фокусировки электронного пучка.

В большинстве случаев положение плоскости точной фокусировки определяется определенным способом: найденным (например, [2–6]) значением тока возбуждения объективной линзы, который играет для данного способа роль регулируемого параметра.

Необходимость использования в качестве регулируемого параметра тока возбуждения объективной линзы обуславливается использованием в РЭМ магнитных объективных линз. Программа расчета электронных линз EOD [7] дает возможность установить взаимно однозначное соответствие между током возбуждения магнитной линзы и относительным положением точки фокусировки пучка, определяемым, например, расстоянием от нижней плоскости полюсных накопечников до точки фокусировки. Это позволяет откалибровать объективную линзу по току возбуждения, определив необходимый шаг изменения тока возбуждения линзы для обеспечения нужного шага изменения высоты точки фокусировки пучка относительно выбранной плоскости [8]. Для расчета магнитных полей в программе использовался метод конечных элементов [9]. Построение траекторий электронов производилось с использованием метода Рунге–Кутты [10].

Основным недостатком приведенных выше способов определения положения плоскости точной фокусировки является высокая чувствительность положения точки фокусировки к значению тока возбуждения магнитной линзы. При типичных значениях тока возбуждения 1.5 А для изменения положения точки фокусировки на 10 нм требуется изменить ток возбуждения на 3 мкА. Точное и контролируемое изменение тока возбуждения объективной линзы на такие малые значения – недостижимая задача для стандартных источников тока, используемых в РЭМ.

Возможность выставления точки фокусировки пучка в нужное положение с высокой точностью может быть реализована путем введения в электронно-оптическую систему РЭМ дополнительного электрода, который устанавливается между катодом и анодом электронной пушки ближе к аноду. Эта конструкция была реализована в электронно-оптической системе РЭМ (ЭОС РЭМ), описание которой приведено в работе [11]. Схематическое изображение ЭОС с добавочным электродом показано на рис. 1.

В приведенной схеме катод 1 испускает электроны, которые ускоряются в сторону анода 3 и приобретают энергию в соответствии с разностью потенциалов между катодом и анодом. Электроны составляют электронный луч 4, который фокусируется на образце 5 объективной линзой 6.

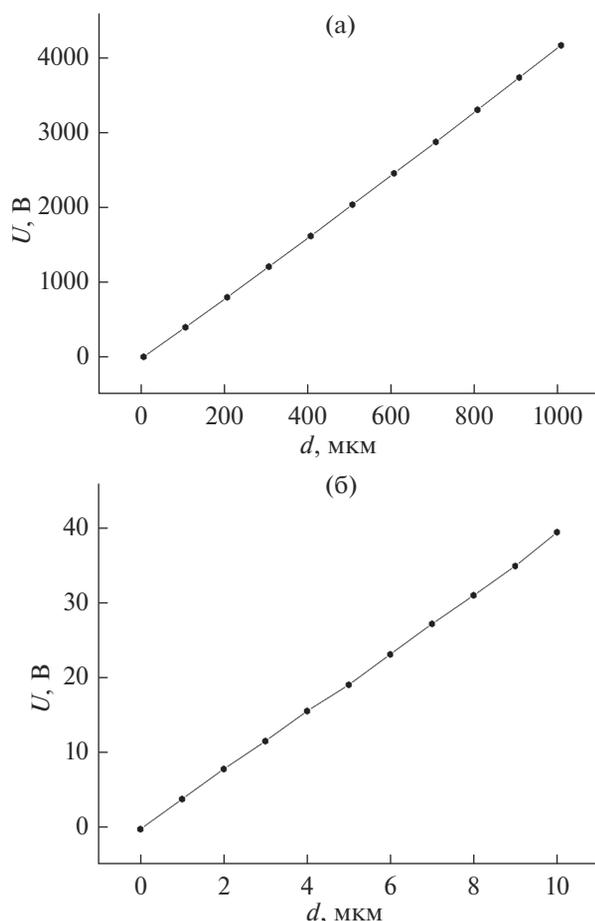


Рис. 2. Зависимости разности потенциалов U от расстояния d точки фокусировки пучка до плоскости рабочего отрезка с шагом 100 мкм (а) и 1 мкм (б).

Если добавочный электрод имеет потенциал анода, то согласно расчетам, для энергии пучка 5 кэВ ЭОС фокусирует электронный пучок в плоскости рабочего отрезка, равного 5 мм. При изменении разности потенциалов $U = U_A - U_2$ между анодом 3 и добавочным электродом 2 изменяется положение плоскости фокусировки электронного пучка, при этом конечная энергия электронов не меняется. Таким образом, потенциал дополнительного электрода может быть использован в качестве регулируемого параметра. Между потенциалом электрода и относительным положением точки фокусировки электронного пучка устанавливается взаимно однозначное соответствие. На рис. 2 приведены зависимости значения разности потенциалов U дополнительного электрода 2 относительно анода 3 от расстояния d точки фокусировки пучка до плоскости рабочего отрезка 5 мм, в которой находится точка фокусировки при $U = 0$, с шагом 100 и 1 мкм.

Чувствительность системы $\Delta d/\Delta U$, равная изменению положения точки фокусировки пучка

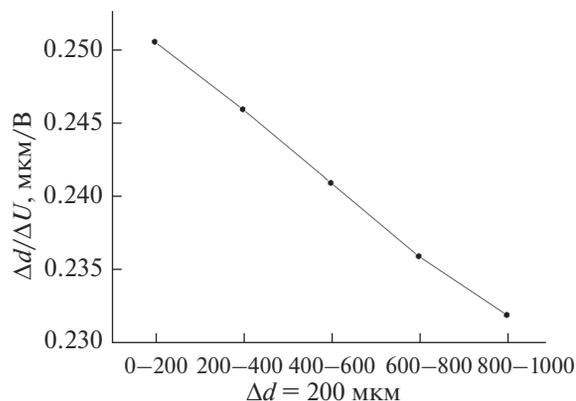


Рис. 3. Зависимость чувствительности системы $\Delta d/\Delta U$, рассчитанной на последовательных промежутках $\Delta d = 200$ мкм.

при изменении разности потенциалов ΔU на 1 В, падает с увеличением расстояния d . На рис. 3 показано изменение чувствительности системы, рассчитанной на последовательных промежутках изменения расстояния Δd в 200 мкм.

При изменении расстояния d точки фокусировки от 0 до 1 см чувствительность уменьшается с 250 до 230 мкм/В.

Зависимость, показанную на рис. 2б, можно считать линейной с чувствительностью на каждом шаге в 1 мкм, равной 0.250 мкм/В. Это означает, что для изменения положения точки фокусировки на 10 нм относительно плоскости рабочего отрезка в диапазоне от одного до 10 мкм надо уменьшить потенциал добавочного электрода на 4 мВ. Такая чувствительность позволяет менять положение точки фокусировки при необходимости на единицы и десятые доли нанометров. Таким образом, достигается более высокая точность выставления плоскости фокусировки электронного пучка по сравнению с методами, в которых в качестве регулируемого параметра используется ток возбуждения объективной линзы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ПЛОСКОСТИ ФОКУСИРОВКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОВЕРХНОСТИ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА

Чтобы связать относительное положение плоскости фокусировки электронного пучка с высотой этой плоскости относительно поверхности исследуемого образца, нами предложен следующий метод.

Электронным пучком сканируют поверхность объекта поперек топологического элемента, находящегося на этой поверхности, с одновременным изменением для каждой линии сканирования значения регулируемого параметра. Для каждого значения регулируемого параметра получают

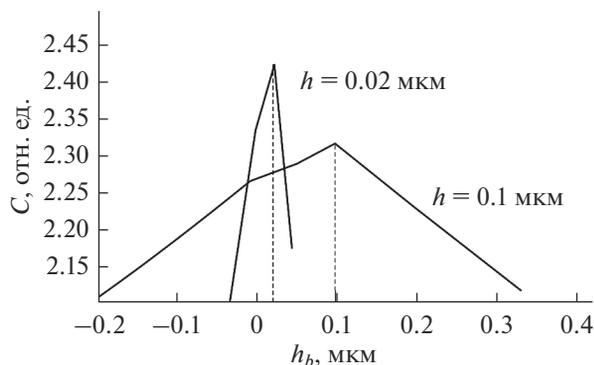


Рис. 4. Зависимость контраста C от высоты h_b точки фокусировки электронного зонда над гладкой поверхностью образца при поперечном сканировании трапециевидных полосок высотой 0,1 и 0,02 мкм. Энергия электронов 3 кэВ, диаметр пучка в точке фокусировки 1 нм, угол расходимости пучка $\alpha = 10^{-2}$ рад.

вторично-эмиссионный сигнал, преобразуют этот сигнал в цифровую форму и определяют значение контраста сигнала.

В ЭОС, показанной на рис. 1, электронный луч сканирует при помощи отклоняющих систем 7 по линии поперек топологического элемента на поверхности объекта. Сигнал вторичных электронов 8 улавливается детектором 9, преобразуется в цифровую форму аналогово-цифровым преобразователем 10 и запоминается в управляющем компьютере 11. Каждой сигналограмме от одной линии сканирования соответствует одно значение регулируемого параметра – потенциала добавочного электрода 2, определяющее положение точки фокусировки пучка. Для каждой сигналограммы определяется значение контраста сигнала C , которое для каждой линии сканирования рассчитывается как $C = \Delta S/S$, где ΔS – амплитуда сигнала вблизи топологического элемента, S – значение сигнала от гладкой поверхности. Значение контраста и соответствующее ему значение потенциала электрода запоминаются. Анализ полученной зависимости контраста сигнала от потенциала добавочного электрода позволяет определить высоту плоскости фокусировки над поверхностью объекта и выставить плоскость точной фокусировки луча в требуемое положение.

Закономерности изменения контраста вторично эмиссионного сигнала в зависимости от высоты точки фокусировки пучка над поверхностью образца были исследованы авторами в ряде теоретических и экспериментальных работ [1, 8, 11–15]. Главная особенность этих зависимостей состоит в том, что точки излома их графиков соответствуют фокусировке пучка на краях граней топологического элемента. В частности, точка максимума соответствует фокусировке на верхней грани и определяет высоту топологического

элемента относительно базовой поверхности образца. Это позволяет связать относительную высоту точки фокусировки с ее высотой над объектом. На рис. 4 показаны зависимости контраста вторично эмиссионного сигнала от высоты точки фокусировки над поверхностью образца, построенные при сканировании поперек трапециевидных кремниевых полосок высотой 0,1 и 0,02 мкм с шагом изменения положения точки фокусировки 20 и 2 нм (работа [8]).

Видно, что наибольшее значение контраста достигается в том случае, когда луч сфокусирован на верхнюю грань топологического элемента (верхняя точка излома). Другой характерной точкой является точка фокусировки на нижней грани (нижняя точка излома).

Преимущества предлагаемого способа основаны на использовании в качестве основного критерия измерений контраста сигнала. Контраст сигнала является объективным критерием, так как он может быть измерен с высокой точностью по одной линии сканирования для каждого значения регулируемого параметра электронного пучка. Поскольку значение S сигнала от гладкой поверхности на протяжении одного цикла измерений остается постоянным, то для упрощения обработки результатов измерений достаточно определить лишь максимум и минимум сигнала при каждом цикле.

Важно отметить, что измерения значений контраста могут быть проведены в реальном времени. За время, эквивалентное получению одного малоформатного кадра изображения (например, 128×128 пикселей), могут быть получены значения контраста для 128 значений тока возбуждения объективной линзы. При той же скорости развертки, что и для основного изображения форматом 8192×8192 пикселей, вспомогательное время определения положения точки фокуса составляет 0,03% от полезного времени. Для сравнения с аналогами предположим, что время выполнения одной процедуры в аналогичном способе составляет 1 с. Тогда при формате кадра изображения 8192×8192 пикселей и длительности пикселя 2,5 нс время получения одного кадра полезного изображения составляет 0,16 с или 5,3% от общей длительности процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный в работе метод обработки сигнала предлагает способ решения двух основных задач, сопутствующих вспомогательным процедурам определения параметров электронного пучка и его коррекции. Это задача определения плоскости точной фокусировки электронного пучка относительно микрорельефа образца и выставления этой плоскости на заданную высоту от-

носителем базовой поверхности исследуемого образца (подложки). Вторая задача – повышение производительности измерений за счет уменьшения времени, необходимого для выполнения вспомогательных процедур определения и установки заданных параметров пучка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа финансировалась в рамках Государственного задания № 075-00475-19-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Савицкая Т.Н. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2014. № 12. С. 31. <https://doi.org/10.1134/S1027451014050073>
2. Watanabe M., Shinada H., Takafuji A., Iizuka M., Gunji Y., Hayakawa K., and Takeda M. // U.S. Patent № 7.030.394 B2 (USPTO Patent Full-Text and Image Database, 2006).
3. Yamada A. // U.S. Patent № 5.198.668 A (USPTO Patent Full-Text and Image Database, 1993).
4. Lawson P.J. // U.S. Patent № 4.514.634 A (USPTO Patent Full-Text and Image Database, 1985).
5. Mochizuki Yuzuru, Kasai Yuji // JP Patent №5970229 B2, 2016.
6. Казьмирук В.В. (RU), Савицкая Т.Н. (RU), ЧОЙ Чанхун (KR). // RU Патент № 2.510.062 С2, 2011.
7. Lencova B., Zlamal J. // Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A. 2011. V. 645. Iss. 1. P. 278. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.12.198>
8. Казьмирук В.В., Савицкая Т.Н. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013 № 2. С. 1.
9. Lencova B. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1999. V. 427. Iss. 1–2. P. 329. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01551-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01551-4)
10. Lencova B., Zlamal J. // Physics Procedia V. 1. Iss. 1. 2008. P. 315. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2008.07.111>
11. Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Подкопаев А.А. и др. // Тез. докл. Росс. конф. по электронной микроскопии. Черногловка, 2014. С. 208.
12. Казьмирук В.В., Савицкая Т.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 9. С. 1077. <https://doi.org/10.3103/S1062873812090080>
13. Казьмирук В.В. Савицкая Т.Н. // Тез. докл. Рос. симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черногловка, 2011. С. 50.
14. Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Осипов Н.Н. и др. // Тез. докл. Рос. симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черногловка, 2013. С. 26.
15. Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Подкопаев А.А. и др. // Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции “Научное приборостроение современное состояние и перспективы развития”. Казань, 2018. С. 130.

Determination of the Beam Focus Plane in Dependence Signal Contrast on Potential of Focusing Electrode in the SEM

V. V. Kazmiruk^{1,*}, I. G. Kurganov^{1,**}, A. A. Podkopaev¹, T. N. Savitskaya^{1,***}

¹*Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Russian Academy of Sciences, Osipyana str., 6, Chernogolovka, 142432 Russia*

*e-mail: kazmiruk@iptm.ru

**e-mail: kurganov@iptm.ru

***e-mail: savitskaja.tatiana@gmail.com

The work considers a method of processing signals in a scanning electron microscope equipped with an additional focusing electrode. The method is based on the dependence of the signal contrast on the potential of the focusing electrode. In turn, the dependence of the signal contrast on the height of the focusing point relative to the base surface of the sample allows us to establish an unambiguous correspondence: the value of the electrode potential is the height of the beam focusing point above the surface of the sample. The proposed method solves the problem of determining the plane of precise focusing of the electron beam relative to the microrelief of the sample and exposing this plane to a given height relative to the base surface of the sample with increased accuracy by changing the potential of the focusing electrode, thereby reducing the time required to correct the position of the beam focusing point.

Keywords: scanning electron microscope, electron optics, electron-optical system, focusing electrode, magnetic lens, plane of precise focusing, electron beam properties measurements.