

УДК 621.385.833.28,537.533.35

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ МИКРО- И НАНООБЪЕКТОВ

© 2019 г. В. В. Казьмирук^{1, *}, И. Г. Курганов^{1, **}, А. А. Подкопаев¹, Т. Н. Савицкая^{1, ***}

¹Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов
Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Московская область, Россия

*E-mail: kazmiruk@iptm.ru

**E-mail: kurganov@iptm.ru

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

Поступила в редакцию 16.11.2018 г.

После доработки 26.12.2018 г.

Принята к публикации 12.01.2019 г.

Проведено компьютерное моделирование электронно-оптической системы низковольтного растрового электронного микроскопа. Расчет электромагнитных полей системы был произведен методом конечных элементов. Установлено, что наиболее удовлетворяющей для низковольтного режима является система с промежуточным ускорением электронов внутри колонны. Показано, что наилучшее сочетание разрешающей способности и производительности может быть реализовано при работе системы третий конденсор—объектив в режиме, близком к телецентрическому. При этом, по сравнению с телецентрическим режимом, производительность измерений может быть повышена на 35% при минимально достижимом разрешении. По сравнению с традиционными конфигурациями растрового электронного микроскопа предлагаемое решение обеспечивает повышение производительности более чем в 100 раз при сохранении заданной погрешности измерений размеров структур с минимальными размерами до 65 нм.

Ключевые слова: растровый электронный микроскоп, электронная линза, электронно-оптическая система, электронная оптика, бустер, магнитная линза, электростатическая линза.

DOI: 10.1134/S0207352819070072

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве случаев при оптимизации параметров растрового электронного микроскопа (РЭМ) [1–4] основным критерием является его разрешение. Однако, в ряде практически важных случаев, в частности, при контроле топологии микроэлектронных структур непосредственно на фоторезисте, необходимо учитывать еще целый ряд дополнительных факторов [5–8].

Например, при выборе оптимального сочетания дозы и фокуса оптического сканера экспонируют 7×7 -матрицу тестовых структур. Размер ячейки матрицы обычно выбирают 200×200 мкм. Далее сканируют в РЭМ все 49 ячеек и по изображениям определяют оптимальное сочетание дозы и фокуса, соответствие размеров, неравномерность ширины линий, шероховатость края и т.п. В данном случае, наряду с высоким разрешением, необходимо обеспечить высокую производительность измерений, что подразумевает работу с максимально возможным током пучка. Разрешение РЭМ выбирают в зависимости от требуемой

погрешности измерений. Разрабатываемый РЭМ предполагается использовать в технологической линейке с минимальными размерами элементов 65 нм, тогда при диаметре пучка 5 нм обеспечивается погрешность измерений менее 8%, что приемлемо для большинства задач [9, 10]. Кроме того, необходимо исключить возможность ухода размеров структур при измерениях за счет подтравливания их электронным пучком, что возможно реализовать, лишь работая при низких ускоряющих напряжениях [11].

Наиболее удачными конфигурациями электронно-оптических систем (ЭОС) низковольтных РЭМ являются системы с промежуточным ускорением электронов и их последующим замедлением [12]. Высокая яркость катода обеспечивается первоначальной энергией электронов. Замедление электронов осуществляется либо при помощи комбинированной магнитно-электростатической линзы, либо катодной линзы. При этом аберрации системы уменьшаются пропорционально коэффициенту замедления.

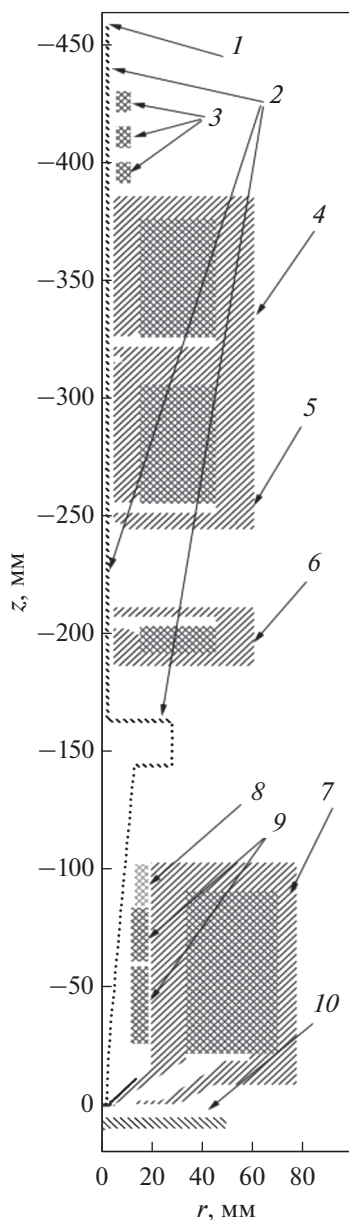


Рис. 1. Сечение электронно-оптической системы РЭМ. 1 – катод, 2 – бустер, 3 – корректирующие катушки, 4 – первая конденсорная линза, 5 – вторая конденсорная линза, 6 – третья конденсорная линза, 7 – объективная линза, 8 – стигматоры, 9 – отклоняющие катушки, 10 – образец.

Дополнительным преимуществом такой схемы является то, что вторичные и обратно рассеянные электроны (ВЭ и ОРЭ) при выходе из образца попадают в ускоряющее поле объективной линзы и могут быть эффективно зарегистрированы in lens детектором.

Еще одним важным моментом является выбор режима работы объективной линзы. Обычно считается, что наилучшее сочетание между разрешением и током обеспечивается в телецентриче-

ском режиме. В этом случае формирующая система состоит из двух линз: последнего конденсора и объектива. Конденсор настроен таким образом, что его передний фокус совпадает с положением промежуточного кроссовера предыдущего конденсора. В результате на выходе конденсора формируется параллельный пучок электронов, который фокусируется в заднем фокусе объективной линзы. Одной из задач данной работы являлось изучение характеристик ЭОС вблизи точки телецентрического режима.

Таким образом, задача оптимизации электронно-оптической системы может быть сформулирована как реализация режима максимальной яркости при низких ускоряющих напряжениях. Такая постановка задачи (с учетом нелинейности системы, возникающей вследствие суперпозиции электростатического и магнитного полей) не является тривиальной и требует отдельного детального рассмотрения.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Расчеты производились для ЭОС низковольтного РЭМ [13, 14], сечение которой показано на рис. 1. ЭОС содержит трехэлектродную электронную пушку с катодом из LaV₆, три магнитные конденсорные линзы с осевыми зазорами, магнитную объективную линзу с радиальным зазором [15, 16], электрод – бустер, восьмиполосные магнитные отклоняющие системы и стигматор.

Исследования проводились на основании программы расчета электромагнитных полей и траекторий в электронно-оптических системах EOD [17–19].

Рассмотрим работу ЭОС в режиме, схематично показанном на рис. 2. Электронная пушка формирует кроссовер, уменьшенный впоследствии двумя конденсорными линзами. Возбуждение третьей конденсорной линзы выбрано таким образом, чтобы ход лучей в ней был телецентрическим в пространстве изображений. Таким образом, на выходе конденсорной линзы пучок пойдет параллельно оптической оси, а в объективной линзе при фокусировке электронный пучок сфокусируется в задней фокальной плоскости, то есть ход лучей в объективной линзе будет телецентрическим в пространстве предметов. Назовем такой режим работы системы линз объектив с третьим конденсором телецентрическим (рис. 3). Такой режим обеспечивает максимально возможный ток электронного пучка, поскольку в этом случае диафрагма отсекает минимальную площадь пучка при одинаковых углах наклона к оптической оси электронов, выходящих из предметной плоскости конденсора.

Объективная линза работает в телецентрическом режиме, поэтому формируемое линзой

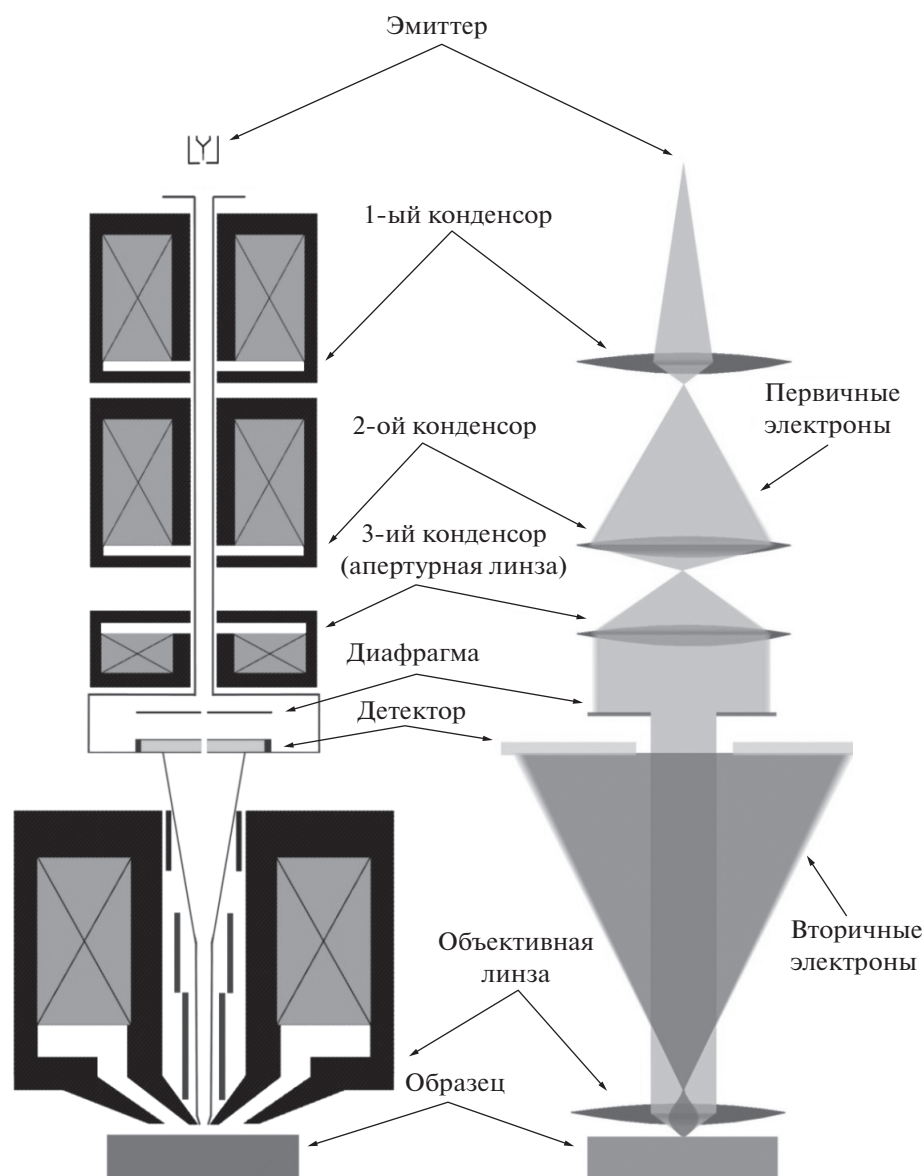


Рис. 2. Схематическое изображение ЭОС РЭМ – слева; схема формирования первичного пучка и регистрация вторичных электронов – справа.

изображение находится в ее фокальной плоскости при $Z = 5$ мм. Между объективной линзой и образцом происходит резкое изменение электростатического поля, которое приводит к замедлению первичных электронов пучка и изменению их траекторий.

Методика оптимизации. Прежде всего, используя традиционное выражение для радиуса электронного зонда на образце (1) [20], определяем оптимальный полуугол (α_{opt}) сходимости электронов, падающих на образец, для заданного значения конечной энергии электронов E_L . Расчеты проводились для диапазона энергий $E_L =$

$= 50\text{--}5000$ эВ. В статье приведены результаты для $E_L = 5000$ эВ.

$$r_p = (r_g^2 + r_c^2 + r_s^2 + r_d^2)^{1/2}, \quad (1)$$

где r_g – диск гауссова изображения: $r_g = (i/\beta\pi^2\alpha^2)^{1/2}$; r_s – диск сферической aberrации: $r_s = (1/2)C_s\alpha^3$; r_d – диск Эйри: $r_d = 1.22\lambda/\alpha$; r_c – диск хроматической aberrации: $r_c = (\Delta E/E)C_c\alpha$; i – ток пучка, α – угол, β – электронная яркость, C_c – коэффициент хроматической aberrации, ΔE – энергетический разброс электронов, вылетающих с поверхности катода, E – энергия электронов пучка, C_s – коэффициент хроматической aberrации, λ – длина волны электронов.

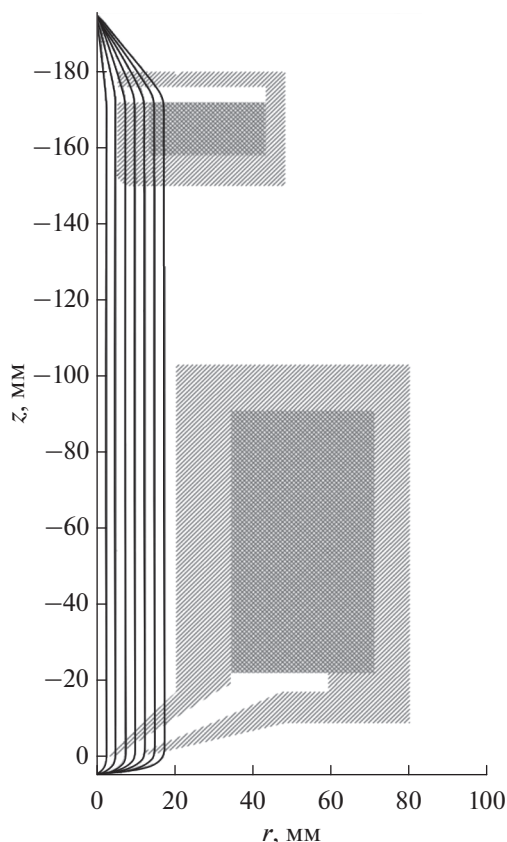


Рис. 3. Ход лучей в режиме максимального тока (масштаб траекторий электронов в направлении, перпендикулярном оптической оси, $\times 500$ раз).

Поскольку данная система является нелинейной вследствие наложения электростатического и магнитного полей, то угловое увеличение в ней не равно линейному. Поэтому данные параметры определялись для заданной конфигурации ЭОС при помощи программы EOD. Далее, исходя из значения α_{opt} и углового уменьшения, определялся требуемый диаметр апертурной диафрагмы.

Для выбранного диаметра диафрагмы и энергии пучка рассчитывали серии траекторий электронов при различных значениях возбуждения апертурной линзы и по ним определяли диаметр и ток пучка в плоскости объекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Была рассчитана серия траекторий электронов, в которой все траектории качественно можно разделить на пять различных типов. Эти пять типов указаны на рис. 4. Режим фокусировки, описанный выше, соответствует траекториям, обозначенным номером II, здесь траектории (по большей части межлинзового пространства) идут параллельно оси системы. Траектории под номером I соответствуют ситуации, при которой конденсор недовозбужден по сравнению с телецентрическим режимом. Напротив, траектории под номером III соответствуют ситуации, при которой на катушку конденсора подан повышенный ток. Дальнейшее увеличение тока возбуждения конденсора ведет к ситуации IV, при которой фокусировка в плоскости образца осуществляется исключительно самой конденсорной линзой, при этом объектив оказывается выключенным. Еще большее увеличение тока возбуждения конденсора приводит к фокусировке пучка конденсором еще до плоскости образца. Таким образом, возникает двойная фокусировка, качественно показанная на рис. 4 под номером V.

На рис. 5 показан график зависимости диаметра пучка в плоскости образца от возбуждения третьей конденсорной линзы при соответствующем изменении возбуждения объективной линзы для сохранения плоскости наименьшего сечения пучка в плоскости образца.

Цифрами II, III, IV указаны точки, соответствующие режимам фокусировки II, III и IV, показанным на рис. 4. Точки, лежащие левее точки II, соответствуют режиму I. Точки, лежащие правее точки IV, соответствуют режиму V.

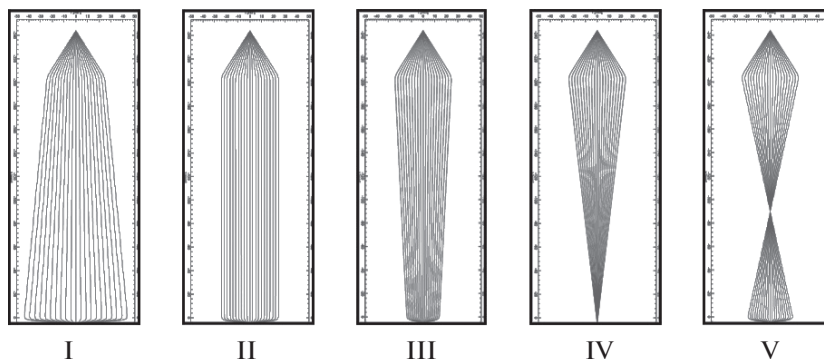


Рис. 4. Режимы фокусировки для системы третий конденсор—объектив.

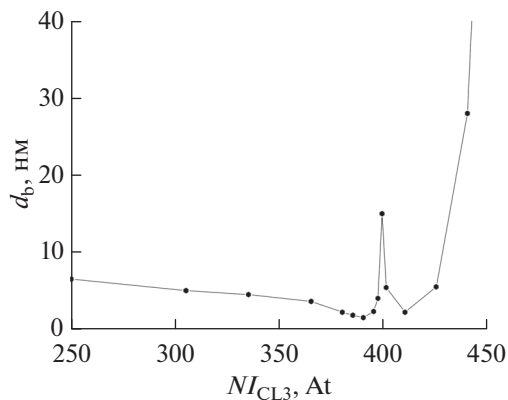


Рис. 5. График зависимости диаметра пучка от возбуждения третьей конденсорной линзы.

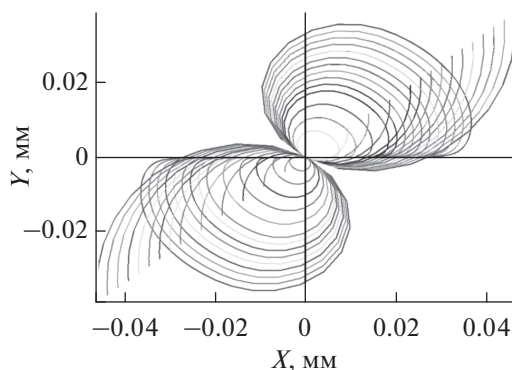


Рис. 6. Проекция траекторий электронов с конечной энергией 5000 эВ на плоскость, перпендикулярную оптической оси.

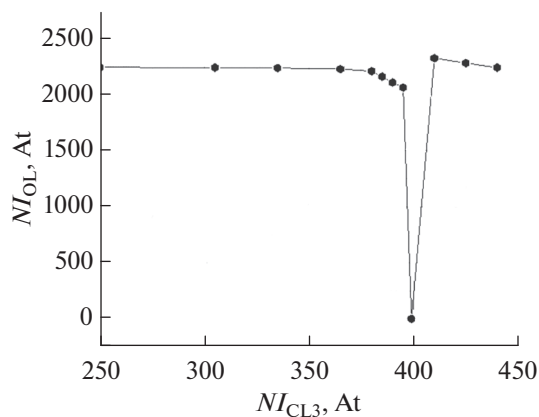


Рис. 7. График зависимости возбуждения объективной линзы от возбуждения третьей конденсорной линзы при сохранении плоскости изображения.

Как можно увидеть из графика зависимости, приведенной на рис. 5, наименьшее значение диаметра электронного пятна на образце (2.2 нм)

достигается при возбуждении третьей конденсорной линзы, равном 380 ампер-виткам, то есть при большем возбуждении, чем при телецентрическом режиме фокусировки (365 ампер-витков). Этот факт объясняется наличием в непосредственной близости образца одновременно магнитного и электростатического полей, в результате воздействия которых электронный пучок в области фокусировки приобретает жгутообразную форму (рис. 6), изменяющую его диаметр.

На рис. 7 показан график зависимости возбуждения объективной линзы от возбуждения третьей конденсорной линзы. Эти значения соответствуют тем же условиям, которые были использованы при построении графика на рис. 5. Наблюдается провал в возбуждении объективной линзы до нуля. Эта точка соответствует режиму фокусировки, при котором плоскость изображения третьей конденсорной линзы совпадает с плоскостью образца.

Программа EOD дает возможность смоделировать траектории электронов в комбинированном поле и определить при помощи процедуры оптимизации значение возбуждения объективной линзы, при котором в плоскости образца достигается минимальное значение диаметра такого пучка. В случае комбинированного поля внешняя граница электронного пятна на образце, задающая его диаметр, формируется электронами, имеющими для каждого значения возбуждения объективной линзы свой радиус и угол вылета из источника (не обязательно максимальные). Поэтому для корректного проведения процедуры оптимизации необходимо было выбрать набор электронов источника с такими радиусами и углами вылета, которые позволяют в рассматриваемом диапазоне возбуждений верно определять диаметр пятна на образце.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика оптимизации ЭОС низковольтного РЭМ позволяет реализовать неразрушающий контроль структур с высокой производительностью, начиная с диаметров пучка 4–5 нм. По сравнению с телецентрическим режимом оптимальный выбор диаметра апертурной диафрагмы и тока конденсорной линзы позволяет повысить производительность в 1.3 раза.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Казьмирук В.В., Савицкая Т.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2009. Т. 10. С. 37.
2. *Bunday B., Kramer U.* // ISMI, Qimonda Dresden GmbH. Proc. of SPIE. 2009. V. 7272 P. 727204.
3. *Kazmiruk V.V., Varabanenkov M.Yu.* // ECS Transactions. 2009. V. 23. № 1. P. 43.
4. *Барабаненков М.Ю., Казьмирук В.В., Курганов И.Г.* // Росс. конф. по электронной микроскопии. г. Черногоровка, 2012. Тезисы докладов. С. 172.
5. *Kazmiruk V.V., Savitskaja T.N.* // 2008. <http://xxx.lanl.gov/abs/0805.0248>.
6. *Барабаненков М.Ю., Казьмирук В.В., Савицкая Т.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2010. № 9. С. 35.
7. *Казьмирук В.В., Савицкая Т.Н.* // Росс. конф. по электронной микроскопии. г. Черногоровка, 2010. Тезисы докладов. С. 64.
8. *Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Савицкая Т.Н., Бородин А.В., Кузьмин М.Н., Новиков Д.О.* // Межд. форум “Техноюнити – электронно-лучевые технологии для микроэлектроники”. Москва. Зеленоград, 2017. Тезисы докладов. С. 53.
9. *Казьмирук В.В., Савицкая Т.Н.* // Известия РАН. Сер. Физическая. 2010. Т. 74. № 7. С. 1029.
10. *Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Осипов Н.Н., Подкопаев А.А., Савицкая Т.Н.* // Росс. конф. по электронной микроскопии. Москва Зеленоград, 2016. Тезисы докладов. С. 318.
11. *Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Савицкая Т.Н.* // Росс. симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. 2013. г. Черногоровка, 2013. Тезисы докладов. С. 24.
12. *Mullerova I., Frank L.* // Advances in Imaging Electron Physics. 2003. V. 128. P. 309.
13. *Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Савицкая Т.Н.* // Известия РАН. Сер. Физ. 2014. Т. 78. № 9. С. 1058.
14. *Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Осипов Н.Н., Коларжик В., Цоуфалова Е., Дришечка М.* // Росс. конф. по электронной микроскопии. г. Черногоровка, 2014. Тез. докладов. С. 210.
15. *Казьмирук В.В., Савицкая Т.Н.* // Известия РАН. Сер. Физическая. 2011. Т. 75. № 9. С. 1263.
16. *Курганов И.Г.* // Межд. форум “Техноюнити – электронно-лучевые технологии для микроэлектроники”. Москва. Зеленоград, 2017. Тезисы докладов. С. 102.
17. *Lencova B., Zlamal J.* // Electron Optical Design Program (EOD). Vers. 3.69. 2009.
18. *Lencova B., Zlamal J.* // Physics Procedia. 2008. V. 1. Iss. 1. P. 315.
19. *Lencova B., Zlamal J.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2011. V. 645. Iss. 1. P. 278.
20. *Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. и др.* Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. В 2-х книгах. Книга 1 / Пер. с англ. Гвоздовер Р.С., Комолова Л.Ф. М.: Мир, 1984. 303 с.

Electron Optical System Optimization of a Scanning Electron Microscope for Micro- and Nanoobjects Measurements

V. V. Kazmiruk, I. G. Kurganov, A. A. Podkopaev, T. N. Savitskaya

A computer simulation of the electron-optical system of a low-voltage scanning electron microscope has been carried out. The calculation of the electromagnetic fields of the system was carried out by the finite element method. It has been established that the system with intermediate electron acceleration inside the column is the most suitable for the low-voltage mode. It is shown that the best combination of resolution and performance can be realized when the system of 3rd condenser and objective is operating close to a telecentric mode. At the same time, compared with the telecentric mode, the measurement throughput can be increased by 35% at the lowest achievable resolution. Compared with traditional SEM configurations, the proposed solution provides an increase in throughput of more than 100 times while maintaining the specified measurement accuracy of the dimensions of structures with technology node up to 65 nm.

Keywords: scanning electron microscope, electron lens, electron optical system, electron optics, booster, magnetic lens, electrostatic lens.