

**Мырзабекова М.М.¹, Гусейнов Н.Р.¹, Зайцев С.И.², Шабельникова Я.Л.²,
Муратов М.М.¹, Мурадова С.Р.¹, Турарбаева Т.Б.¹**

¹ННЛОТ Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Казахстан, г. Алматы, e-mail: markizat.myrzabekova@gmail.com

²Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов (ИПТМ) РАН,
Россия, г. Черноголовка

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛИТОГРАФИИ ПОСРЕДСТВОМ АСМ

В работе рассматривается один из методов формирования микро- и нано-изображений с высокой точностью контролирования процесса – электронная литография. По сравнению с остальными технологиями наноструктурирования, в частности, с такими как фотолитография, рентгеновская литография, электронная литография является более универсальной. Если не требуется высокая производительность, то можно обойтись только одной электронной литографией. В данной работе описаны технологические процессы электронной литографии на кремниевой подложке с применением резиста на основе полимера ПММА. Облучение проводилось в камере СЭМ электронами с энергией 5 кэВ, 15 кэВ, 30 кэВ и дозой экспонирования 1–10000 мкКл/см². Анализ полученных образцов с помощью оптической и атомно-силовой микроскопии (АСМ) показал зависимость цвета и соответствующей толщины резиста от дозы облучения. На основе профилей толщины резиста, полученных с помощью АСМ, был проведен расчет таких параметров как положительная и негативная чувствительность, также контраст, которые являются определяющими параметрами для электронной литографии. В дополнение к значимости измеренных характеристик: чувствительности и контраста, представленная методика открывает экспериментальный способ изучения процессов взаимодействия электронов с веществом.

Ключевые слова: литография, электронная литография, АСМ, метод центрифугирования, ПММА, доза облучения.

Myrzabekova M.M.¹, Guseinov N.R.¹, Zaitsev S.I.², Shabelnikova Ya.L.²,
Muratov M.M.¹, Muradova S.R.¹, Turarbaeva T.B.¹

¹NNLOT, Al-Farabi Kazakh National University,
Kazakhstan, Almaty, e-mail: markizat.myrzabekova@gmail.com

²Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials RAS, Russia, Chernogolovka

Study of the electron lithography parameters by AFM

The paper considers one of the methods of micro – and nano – images formation with high accuracy of process control – electronic lithography. Comparing to other nanostructuring technologies, such as photolithography, x-ray lithography in particular, electronic lithography is more versatile. If high productivity is not required, it is possible to use only one electron lithography. This paper describes the technological processes of electron lithography on a silicon substrate using a polymer-based resist PMMA. The irradiation was carried out in the SEM chamber by electrons with energy of 5 keV, 15 keV, 30 keV and an exposure dose of 1–10000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. The analysis of the obtained samples using optical and atomic force microscopy (AFM) showed the dependence of the color and the corresponding thickness of the resist on the radiation dose. The calculation of such parameters as positive and negative sensitivity and additionally contrast was carried out on the basis of the resist thickness profiles obtained by AFM. These characteristics are defining parameters for electron lithography. In addition to the significance of

the measured characteristics: sensitivity and contrast, the presented technique opens up an experimental way of studying the processes of interaction of electrons with matter.

Key words: lithography, electron lithography, AFM, spin-coating method, PMMA, exposure dose.

Мырзабекова М.М.¹, Гусейнов Н.Р.¹, Зайцев С.И.², Шабельникова Я.А.²,
Мұратов М.М.¹, Мурадова С.Р.¹, Тұрарбаева Т.Б.¹

¹АТҰНЗ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан, Алматы қ., e-mail: markizat.myrzabekova@gmail.com

²РФА Микроэлектроника Технологиясы және ерекше тазалағыш материалдар
мәселелері институты (МТМИ), Ресей, Черногловка қ.

АСМ арқылы электронды литографияның параметрлерін зерттеу

Жұмыста процесті жоғары бақылау дәлдігімен микро- және нано-бейнелерді қалыптастыру әдістерінің бірі – электрондық литография қарастырылады. Басқа, атап айтқанда, фотолитография, рентгендік литография сияқты наноқұрылымдау технологияларымен салыстырғанда, электронды литография әмбебап болып табылады. Егер жоғары өнімділік қажет болмаса, тек бір электронды литографияны қолдануға болады. Бұл жұмыста кремний төсенішіндегі ПММА полимері негізіндегі резисті қолдана отырып, электронды литографияның технологиялық процестері сипатталған. Сәулелендіру СЭМ камерасында 5 кэВ, 15 кэВ, 30 кэВ энергиясы бар электрондармен және 1-10000 мКл/см² экспонаттау дозасымен жүргізілді. Алынған үлгілерді оптикалық және атомдық-күшейткіш микроскопия (АКМ) көмегімен талдау түсінің және резистің тиісті қалыңдығының сәулелену дозасына тәуелділігі көрсетілді. АКМ бойынша есептелген резист қалыңдығының профилдері негізінде оң және теріс сезімталдық және контраст сияқты параметрлердің есептеуі жүргізілді. Бұл сипаттамалар электронды литографияның шешуші параметрлері болып табылады. Өлшенген сипаттамалардың: сезімталдық пен контрастың маңыздылығына қоса ұсынған техника электрондардың заттармен өзара әрекеттесу үрдістерін зерттеудің тәжірибелік әдісін ашады.

Түйін сөздер: литография, электрондық литография, АКМ, центрифугалау әдісі, ПММА, экспозициялық мөлшер.

Введение

Развитие современной технологии микроэлектроники идет в направлении миниатюризации элементов интегральных схем, а значит, непосредственно связано с усовершенствованием методов литографии. В последние 30 лет независимо и с переменной популярностью развивались подходы, основанные на использовании пучков частиц четырех типов: рентгеновских и ультрафиолетовых квантов, электронов и ионов [1]. Однако в последние годы, когда характерные размеры элементов микросхем существенно уменьшились, и стоит вопрос о преодолении суб-десяти-нанометрового рубежа, только методы электронно-лучевой и ионной литографии имеют потенциал продемонстрировать соответствующее разрешение.

Литография – это метод нанесения изображения на поверхность с помощью маски или шаблона. В основе литографии лежит физико-химический принцип точного «выборочного» структурирования поверхности с целью получения изображения или заданной схемы, а также подразумевающий получение оттиска с совершенно гладкой поверхности, которая, благодаря

соответствующей обработке, приобретает свойство на отдельных своих участках принимать специальную литографскую краску [2]. Современная литография в больших объемах используется для производства афиш, карт, книг, газет и упаковок – примером может служить любой гладкий, серийно выпускаемый продукт с печатью на нем.

Процесс (микро- и нано-) литографии состоит из множества технологических операций, в совокупности предназначенных для формирования рельефного рисунка на специальном чувствительном слое (резисте) при изготовлении полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и сверхпроводниковых наноструктур. Сформированный на специально нанесенном слое рисунок, как правило, необходим для последующей обработки поверхности – травления, напыления или электроосаждения, – для переноса рельефного рисунка непосредственно на структурный слой или подложку [3].

В настоящее время по способу воздействия литография разделяется на фотолитографию (облучение ультрафиолетовым излучением) [4], рентгеновскую литографию (облучение рентгеновским излучением) [5], коллоидную лито-

графию [6], электронно-лучевую (облучение электронами) [7] и ионно-лучевую (облучение ионами) [8].

Преимущества применения многолучевой электронной литографии проявляются в различных областях – и все они ведут к уменьшению стоимости и увеличению адаптивности технологических процессов, используемых в производстве интегральных схем (ИС). Данная технология может быть использована как для пластин диаметром 300 мм, так и 200 мм [9]. Сам метод электронно-лучевой литография применяется для изготовления субмикронных и наноразмерных топологических элементов посредством экспонирования электронным лучом поверхности материала чувствительного к облучению [2, 10]. В отличие от электронной литографии, размеры элементов в фотолитографическом процессе принципиально ограничены длиной волны используемого излучения [11].

Область применения электронной литографии – монетные дворы, фотолитография (изготовление масок), сотовые телефоны [12-14].

Применение электронно-лучевой литографии позволяет:

а) получать элементы рисунка с размерами менее или равными 0,01 мкм (для фотолитографии не менее 0,5 мкм);

б) с высокой точностью контролировать дозу электронного пучка, падающего на резист и подложку;

в) легко отклонять и модулировать электронный пучок с высокой точностью электрическими и магнитными полями;

г) формировать в ряде случаев топологию схемы непосредственно на пластине;

д) автоматизировать технологию создания топологического рисунка;

е) профилировать электронный пучок. [15,16].

В данной работе представлены результаты изучения особенностей электронно-лучевой литографии, в частности таких важных параметров, как контраст и чувствительность полимера.

Методика выполнения и расчеты

Схематически современный процесс наноструктурирования выглядит довольно просто (рис. 1). Сначала на рабочую подложку (обычно это пластина кремния) наносится тонкий слой резиста (толщиной десятки-сотни нанометров). Современные резисты представляют собой по-

лимерные материалы чувствительные к излучению, растворимость облученных участков либо увеличивается (резист позитивного тона), либо уменьшается (резист негативного тона). Затем проводится экспонирование, некоторые области резиста подвергаются облучению электронным или световым пучком [3].

Следующим шагом является проявление (обычно используется жидкостное травление), из-за изменения растворимости облученные области позитивного резиста растворяются полностью до подложки. В случае негативных резистов удаляются необлученные участки резиста. Далее, как показано на рисунке 1, полученная структура подвергается сухому «вертикальному» травлению и рисунок из резиста переносится в подложку. Но очень распространенным является процесс «лифт-офф», при котором происходит напыление например слоя металла, а затем в сильном растворителе удаляется оставшийся резист. Вместе с резистом удаляется и слой нанесенного металла. В результате на подложке остается рисунок в виде облученных областей (или инверсный рисунок в случае негативного резиста). Очень часто вместо слов литография, облучение или экспонирование употребляют термин рисование [3].

Необходимые материалы для для получения слоя резиста: подложка кремния, вакуумный насос, дистиллированная вода, ацетон, ПММА (полиметилметакрилат) марки ЭПП-20. Для работы была собрана установка центрифугирования, для получения тонкого слоя резиста.

Экспонирование проводилось в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Quanta 200i 3D, FEI Company. Для контроля результатов эксперимента использовался оптический микроскоп DM 6000M, Leica.

Реализация нанесения резиста на кремниевую подложку:

Для начала производится подготовка подложек с помощью очистки ацетоном. Для быстрой химической реакции ацетон нагревается до 150°C в течение 10-15 секунд. Далее подложки промывают сначала в изопропиле (спирт) и затем в дистиллированной воде. Остатки воды удаляют потоком воздуха. Важным фактором является отсутствие капель воды или пылинок, которые могут существенно помешать получению однородного слоя резиста постоянной толщины.

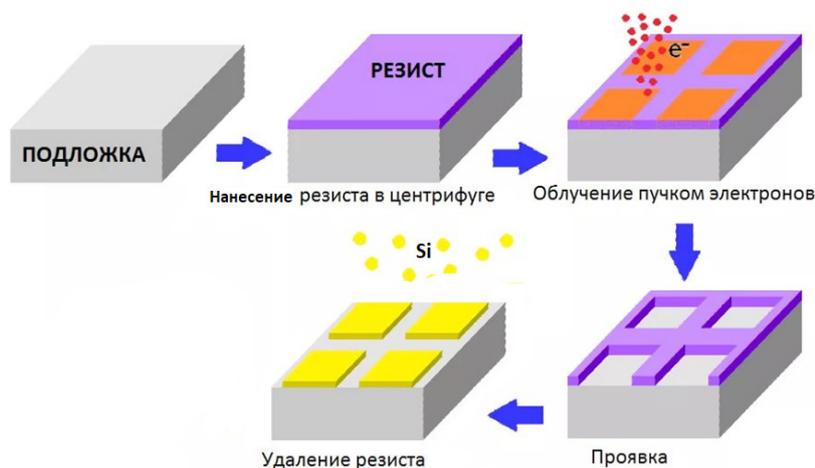


Рисунок 1 – Процесс проведения электронной литографии



Рисунок 2 – Технология нанесения резиста на кремниевую подложку

Далее подложка устанавливается в центр вакуумной присоски. Очень важно установить подложку в точности по центру, так как от этого зависит мера распространения раствора по поверхности и качество образуемой пленки. Система центрифугирования настраивается на скорость 3000 оборотов/мин (чем меньше скорость вращения, тем больше толщина пленки). В центр подложки с помощью пипетки наносится раствор ПММА, толщина которого определяется по цвету формируемой пленки. На качество пленки влияют разные факторы, в том числе чистота и концентрация полимера в растворе. Требуемая вязкость раствора достигается добавлением растворителя, и опытным путем подбирается нужная концентрация.

Полученная полимерная пленка на поверхности подложки подвергается сушке при температуре 150°C.

Облучение в СЭМ проводилось при следующих параметрах: диаметр пучка 30 нм, энергиях 5; 15; 30 кэВ и значении тока 106,22 нА.

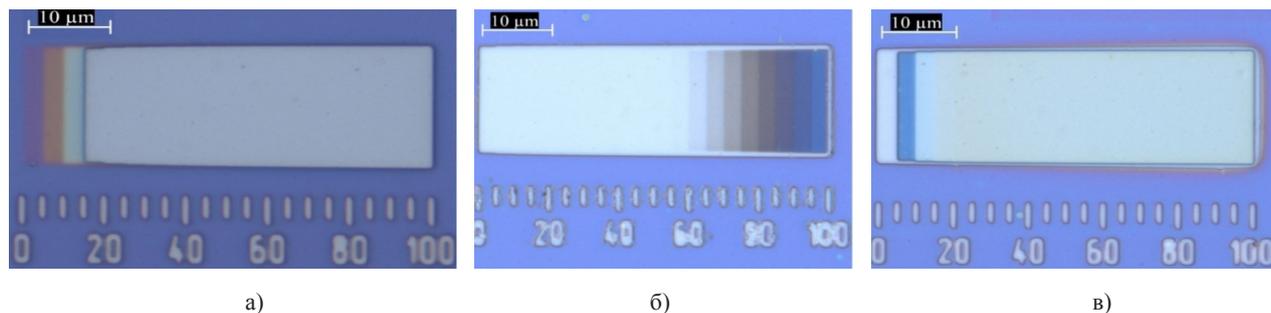
Доза экспонирования была рассчитана по следующей формуле:

$$D = \frac{I \times t}{S} \quad (1)$$

Следующим шагом является исследование образцов с помощью оптической микроскопии. На рисунке 3 представлены оптические микрофотографии образцов, облученных электронным пучком с энергией 5кэВ.

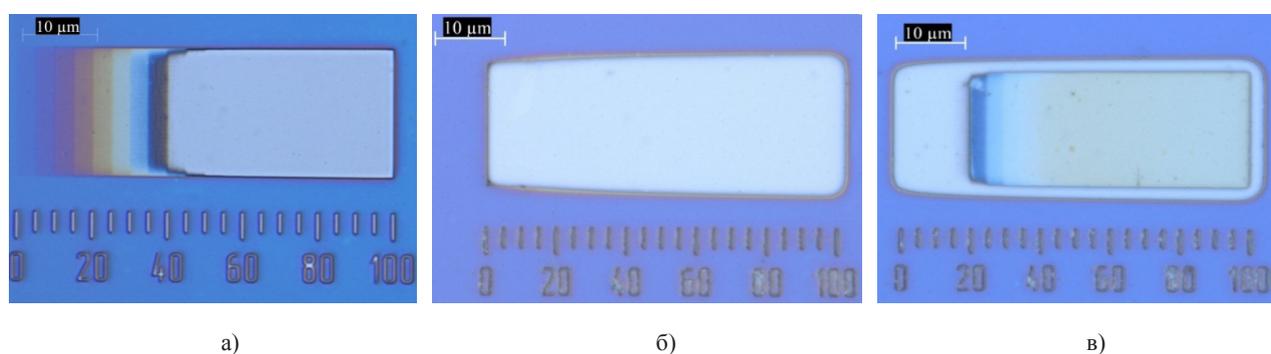
Была проведена серия экспериментов по облучению образцов электронным пучком энергией 15 кэВ, оптические микрофотографии которых показаны на рисунке 4.

Так же были получены оптические микрофотографии образцов с дозой экспонирования от 1 до 10000 мкКл/ см² при энергии 30 кэВ (рис. 5).



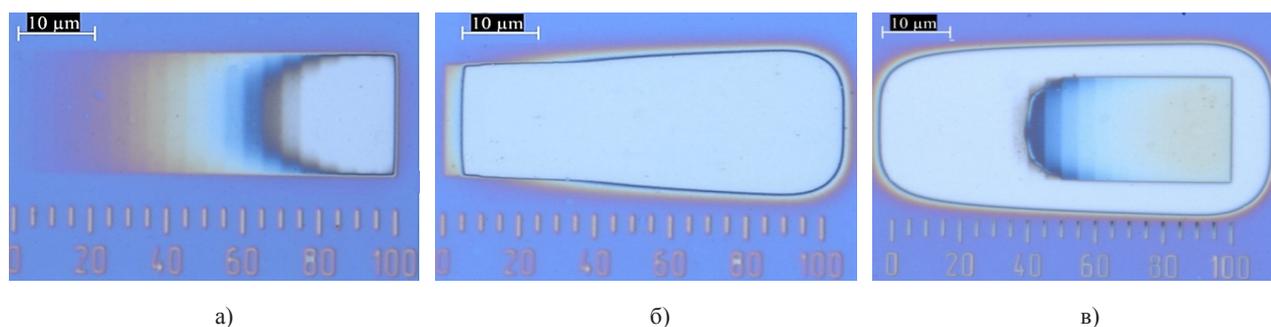
а) доза экспонирования от 1 до 100 (мкКл/см²); б) доза экспонирования от 10 до 1000 (мкКл/см²);
в) доза экспонирования от 100 до 10000 (мкКл/см²)

Рисунок 3 – Оптические микрофотографии образцов облученных электронным пучком с энергией 5 кэВ



а) доза экспонирования от 1 до 100 (мкКл/см²); б) доза экспонирования от 10 до 1000 (мкКл/см²);
в) доза экспонирования от 100 до 10000 (мкКл/см²)

Рисунок 4 – Оптические микрофотографии образцов облученных электронным пучком с энергией 15 кэВ



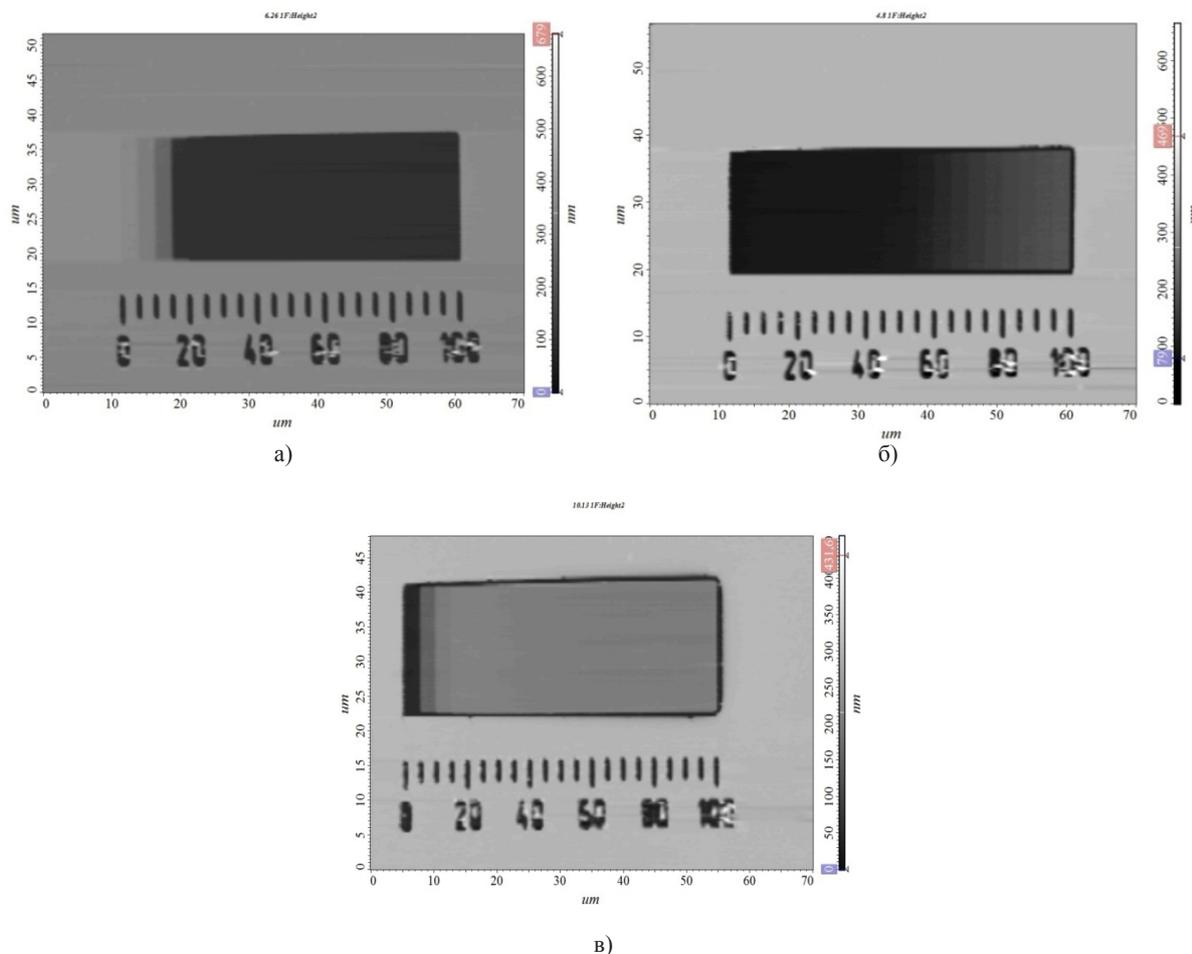
а) доза экспонирования от 1 до 100 (мкКл/см²); б) доза экспонирования от 10 до 1000 (мкКл/см²);
в) доза экспонирования от 100 до 10000 (мкКл/см²).

Рисунок 5 – Оптические микрофотографии образцов облученных электронным пучком с энергией 30 кэВ.

Следующим шагом является исследование образцов с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для этой задачи был использован атомно-силовой микроскоп Solver Spectrum, NT-MDT. Были получены АСМ изображения и

определена толщина резиста, которая составляет 249,15 нм.

Рисунок 6 представляет собой топографию образцов, которые облучены электронами с энергией 5 кэВ с различной дозой экспонирования.



а) доза экспонирования от 1 до 100 (мкКл/см²); б) доза экспонирования от 10 до 1000 (мкКл/см²); в) доза экспонирования от 100 до 10000 (мкКл/см²)

Рисунок 6 – АСМ изображения образцов облученных электронным пучком с энергией 5 кэВ

Также были получены АСМ изображения образцов, облученных электронным пучком энергией 15 кэВ, которые показаны на рисунке 7.

В ходе данного исследования также был определен рельеф поверхности образцов, облученных электронным пучком энергией 30кэВ (рис. 8).

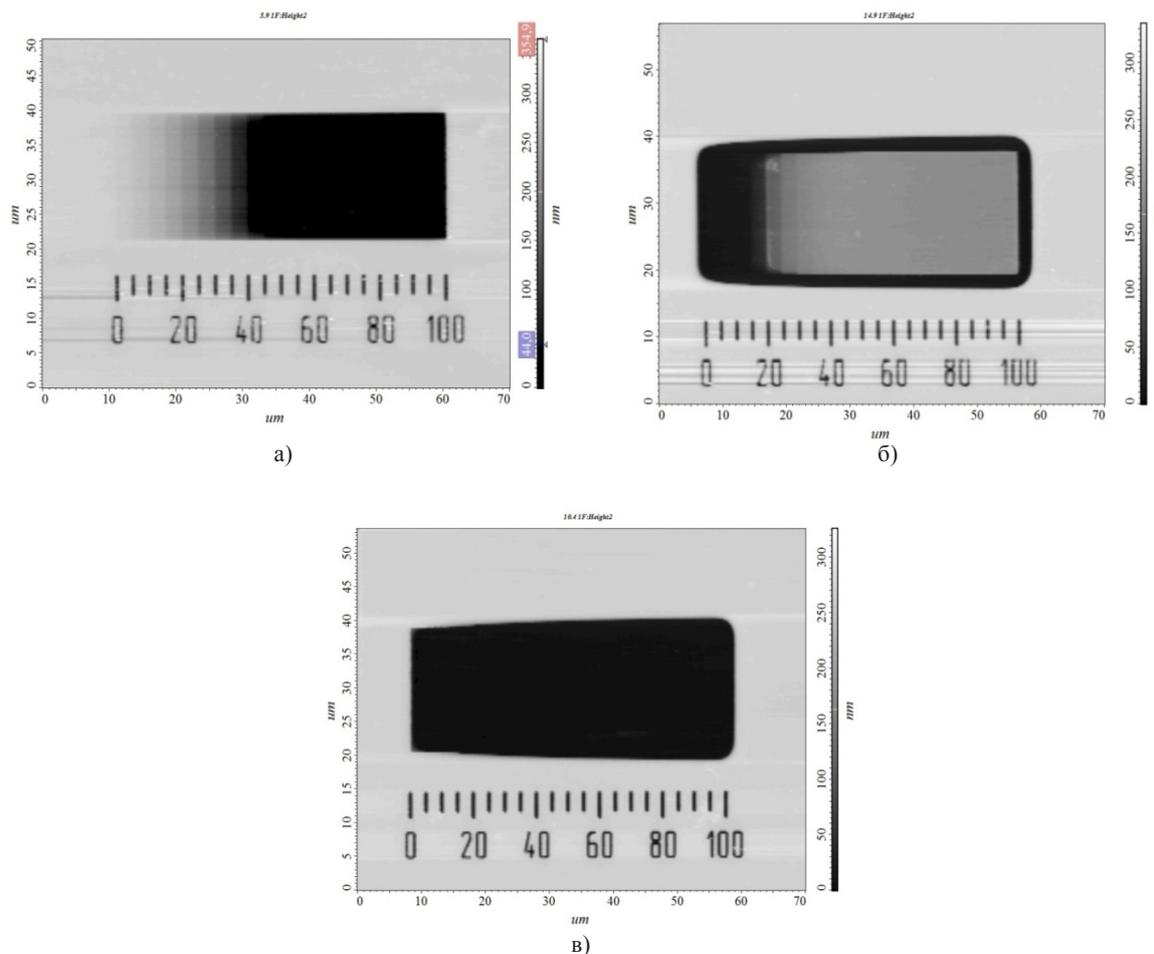
Обработка результатов

Для успешного применения резистов на практике, необходимо знание нескольких параметров, называемых дозовыми характеристиками [17]. Дозовыми характеристиками электронных резистов являются чувствительность и контрастность. Чувствительность позитивного резиста характеризует дозу, которую необходи-

мо передать участку этого резиста для его полной проявки за приемлемое время (обычно 1-2 минуты). Чувствительность, как и дозу экспонирования электронного резиста обычно измеряют в Кл/см² [18].

Посредством топографий, полученных на АСМ, был построен профиль образца, облученного энергией 5кэВ. Из рисунка 9 выявлен параметр положительной и негативной чувствительности, контраста для ПММА марки ЭЛП-20.

Параметр положительной чувствительности был рассчитан посредством программы Origin. Линия начала экспонирования соответствует параметру положительной чувствительности. Параметр положительной чувствительности для 5 кэВ составляет 15,64 мкКл/см².



а) доза экспонирования от 1 до 100 (мкКл/ см²); б) доза экспонирования от 10 до 1000 (мкКл/ см²);
в) доза экспонирования от 100 до 10000 (мкКл/ см²).

Рисунок 7 – АСМ изображения образцов облученных электронным пучком с энергией 15кэВ

Половина толщины резиста характеризует параметр негативной чувствительности. Параметр негативной чувствительности для 5кэВ равен 55,655 мкКл/см².

Другой важной характеристикой электронного резиста является контрастность. Она является характеристикой крутизны рельефа резиста после проявления [19].

Контраст был вычислен по следующей формуле [20]:

$$v = v_0 \left(\frac{D}{D_0} \right)^\gamma, \quad (2)$$

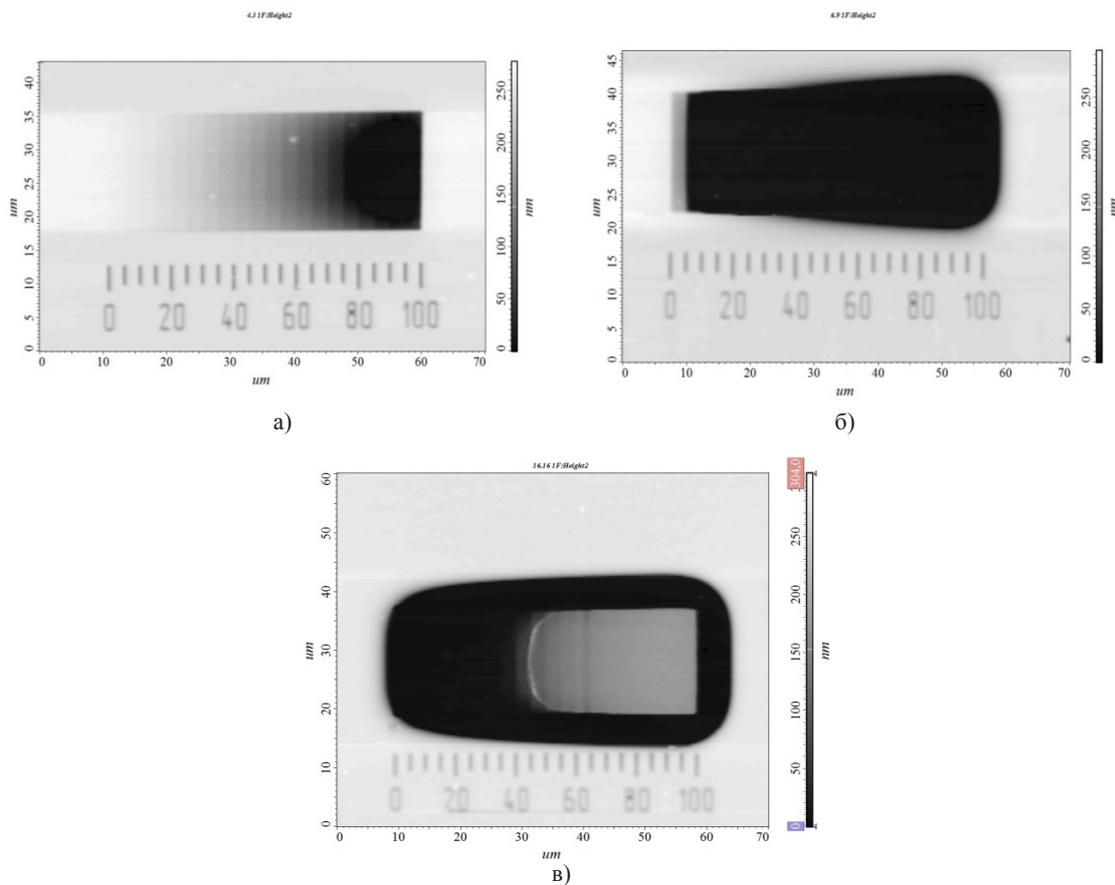
где v это скорость проявления области проэкспонированной с дозой D , а v_0 – скорость проявления области проэкспонированной с

дозой D_0 , параметр γ принимается за контрастность.

Параметр положительного контраста используемого резиста при 5 кэВ равен 2,34, а параметр негативного контраста составляет 0,76.

Так же в программе Origin был построен профиль образца облученного энергией 15кэВ. Параметр положительной и негативной чувствительности, контраста был рассчитан, как описывалось выше. Параметр положительной чувствительности для 15 кэВ равен 42,86 мкКл/см². Параметр негативной чувствительности для 15кэВ составляет 84 мкКл/см²

Также был выявлен положительный контраст при 15 кэВ, который составляет 1,62, негативный контраст – 0,78.



а) доза экспонирования от 1 до 100 (мкКл/ см²); б) доза экспонирования от 10 до 1000 (мкКл/ см²);
в) доза экспонирования от 100 до 10000 (мкКл/ см²).

Рисунок 8 – АСМ изображения образцов облученных электронным пучком с энергией 30кэВ

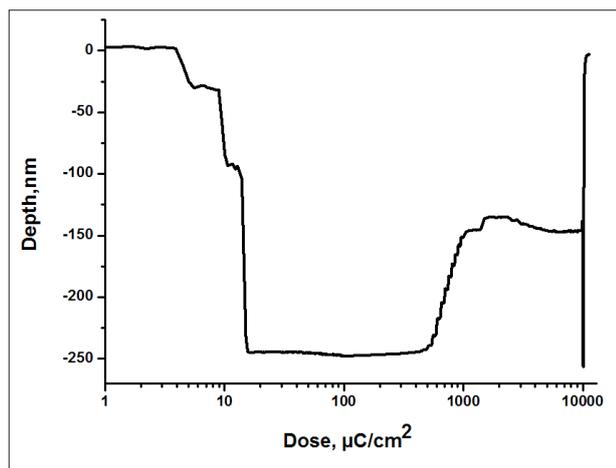


Рисунок 9 – Профиль АСМ изображения образца облученного с энергией 5 кэВ

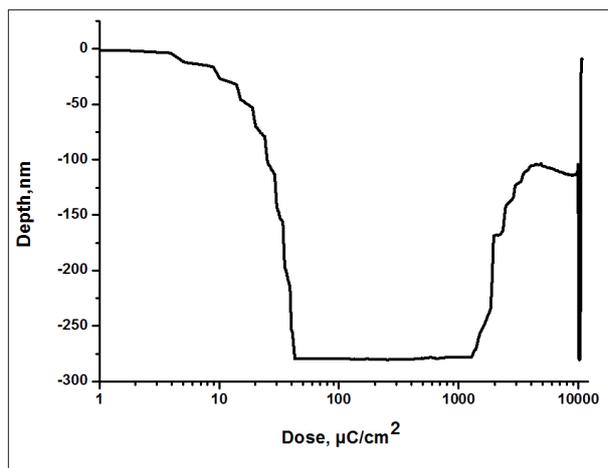


Рисунок 10 – Профиль АСМ изображения образца облученного с энергией облучения 15 кэВ

Следующим этапом было изучение профиля образца, облученного электронами энергией 30кэВ. Из рисунка 11 выявлен параметр положительной и негативной чувствительности, контраста для ПММА марки ЭЛП-20.

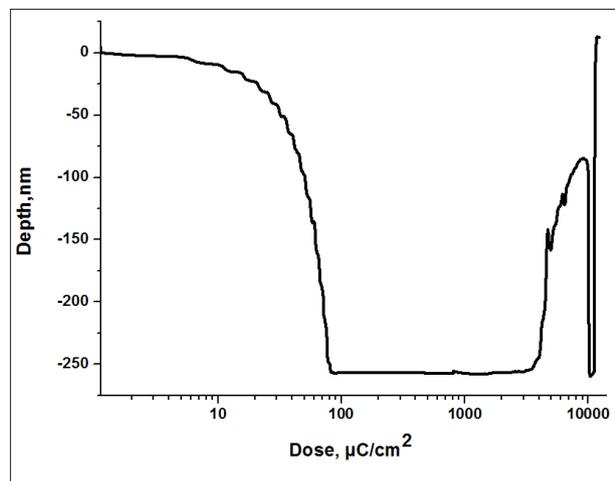


Рисунок 11 – Профиль АСМ изображения образца облученного с энергией 30 кэВ

Параметр положительной чувствительности для 30 кэВ равен 83,14 мкКл/см². Параметр не-

гативной чувствительности 30кэВ составляет 86,25 мкКл/см².

Положительный контраст при 30 кэВ для ПММА равен 1,17, негативный контраст для составляет 0,65.

Заключение

В данной статье было изучено воздействие электронного пучка на резист ПММА и выявлены дозовые характеристики. Выявлены параметры положительной чувствительности для 5, 15, 30 кэВ, которые равны соответственно 15,64; 42,86; 83,14 мкКл/см². Эти значения характеризуют минимальную дозу, необходимую для полного растворения резиста ПММА марки ЭЛП-20. Таким образом, в работе были вычислены параметры литографического процесса при разных энергиях, тем самым определены оптимальные условия для облучения полимера.

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке МОН РК по грантовому финансированию № AP05134926 «Технология электронно-ионной литографии для голографической защиты монет, слитков и изделий из драгоценных металлов».

Литература

- 1 Kratky S., Kolarik V., Horacek M., Meluzin P., Kral S. Combined e-beam lithography using different energies // *Microelectronic Engineering*. – 2017. – Vol. 177. – P. 30–34.
- 2 Саленко Д.С. История развития и области применения технологии МЭМС // *Автоматика и программная инженерия*. – 2013. – № 3(5). – С.68-74.
- 3 Такибаев Н.Ж., Зайцев С.И., Курмангалиева В.О., Насирова Д.М., Такибаева М.Н., Абдыкадыров Б.К. Лабораторный практикум по физике: Виртуальный практикум Nanomaker, Нанотехнологии, Термодинамика: Учебное пособие. – Алматы: КазНПУ им. Абая, 2012. –140 с.
- 4 Cegielskia P.J., Boltena J., Kima J. W., Schlachtera F., Nowaka C., Wahlbrinka T., Gieseckea A. L. and Lemme M. C. Overlay Accuracy Limitations of Soft Stamp UV Nanoimprint Lithography and Circumvention Strategies for Device Applications // *Microelectronic Engineering*. – 2018. – Vol. 197. – P. 83-86.
- 5 Nazmov V., Goldenberg B. Application of ELN-200 in deep X-ray lithography // *Physics Procedia*. – 2016. – Vol. 84. – P. 201 – 204.
- 6 Mehrnoosh Mahmoodiana, Hamidreza Hajihoseinib, Shams Mohajezadeha, Morteza Fathipour. Nano patterning and fabrication of single polypyrrole nanowires by electron beam lithography // *Synthetic Metals*. – 2019. – Vol. 249. – P. 14-24.
- 7 Shi X., Boden Stuart A. Scanning helium ion beam lithography // *Frontiers of Nanoscience*. – 2016. – Vol. 11. – P. 563-594.
- 8 Shi X., Prewett P., Huq E., Bagnall D.M., Robinson A.P.G., Boden S.A. Helium ion beam lithography on fullerene molecular resists for sub-10 nm patterning // *Microelectronic Engineering*. – 2016. – Vol. 155. – P. 74–78.
- 9 Гусейнов Н.Р., Муратов М.М., Габдуллин М.Т., Немкаева Р.Р., Мырзабекова М.М., Шабельникова Я.Л., Зайцев С.И. Экспериментальное изучения распределения энергии в ионно-лучевой литографии // 5 Международная научная конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологии и наноматериалов». – Алматы, 17-18 Мая 2018. – С.193-194.
- 10 Scott Hector. Recent Advances in Lithography and High Level Critical Dimension Metrology Needs for Lithography // *AIP Conference Proceedings*. – 2005. – Vol. 788. – P. 359-368.
- 11 Kim H.S., Ahn S., Kim D.W., Kim Y.C., Ahn, S.J. Photo-mask fabrication by low-energy microcolumn lithography // *Microelectronic Engineering*. – 2009. – Vol. 86. – P. 2049–2052.

- 12 Mohammad M.A., Fito T., Chen J., Buswell S., Aktary M., Stepanova M., Dew S.K. Systematic study of the interdependence of exposure and development conditions and kinetic modelling for optimizing low-energy electron beam nanolithography // *Microelectronic Engineering*. – 2010. – Vol. 87. – P. 1104–1107.
- 13 Myrzabekova M.M., Sarkar S., Baigarinova G.A., Guseinov N.R., Ilyin A.M. Obtaining and research of new composite materials polymer-graphene // *Physical Sciences and Technology*. – 2014. – Vol. 1. – P. 4-9.
- 14 Vieu C., Carcenac F., Pepin A., Chen Y., Mejias M., Lebib A., Manin-Ferlazzo L., Couraud L., Launois H. Electron beam lithography: resolution limits and applications // *Applied Surface Science*. – 2000. – Vol. 164. – P. 111-117.
- 15 Tennant D.M, Bleier A.R. Electron Beam Lithography of Nanostructures // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. – 2016. – P. 1-25.
- 16 Rai-Choudhury P. Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication. – SPIE, 1997. – Vol. 1. – 776 p.
- 17 Vutova K., Mladenov G. Sensitivity, contrast and development process in electron and ion lithography // *Microelectronic Engineering*. – 2001. – Vol. 57. – P. 349–353.
- 18 Myrzabekova M. M., Guseinov N.R., Muratov M.M., Gabdullin M.T., Nemkayeva R. R., Tolkyrbayeva T., Shabelnikova Ya. L., Zaitsev S. I. Experimental study of energy distribution in ion-beam lithography // *Proc. 6th International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS-2018)*. – Almaty, August, 2018. – P. 84.
- 19 Jordi Samàa, Guillem Domènech-Gila, Isabel Gràciac, Xavier Borrisc, Carles Cané, Sven Barthd, Frederik Steibe, Andreas Waage, Joan-Daniel Pradesa, Albert Romano-Rodríguez. Site-selectively grown SnO2 NWs networks on micromembranes for efficient ammonia sensing in humid conditions // *Sensors and Actuators B*. – 2019. – Vol. 232. – P. 402-409.
- 20 Knyazev M.A., Dubonos S.V., Svintsov A.A., Zaitsev S.I. Fast electron resist contrast determination by “fitting before measurement” approach // *Microelectronic Engineering*. – 2007. – Vol. 84. – P. 1080–1083.

References

- 1 S. Kratky, V. Kolarik, M. Horacek, P. Meluzin, and S. Kral, *Microelectronic Engineering*, 177, 30–34 (2017).
- 2 D.S. Salenko, *Automation and software engineering*, 3 (5), 68-74 (2013). (in Russ).
- 3 N.Zh. Takibayev, S.I. Zaitsev, V.A. Kurmangalieva, D.M. Nasirov, M.N. Takibaev, B.K. Abdykadyrov, *Laboratory workshop in physics: Virtual workshop nanomaker, Nanotechnology, Thermodynamics. Textbook*, (Abay KazNPU, Almaty, 2012).- 140 p. (in Russ)
- 4 P.J. Cegielskia, J. Boltena, J.W. Kima, F. Schlachtera, C. Nowaka, T. Wahlbrinka, A. L. Giesecke and M. C. Lemme, *Microelectronic Engineering* 197, 83-86 (2018).
- 5 V. Nazmov, Boris Goldenberg, *Physics Procedia* 84, 201-204 (2016).
- 6 M. Mahmoodiana, H. Hajihoseinib, S. Mohajerzadeha, Morteza Fathipour, *Synthetic Metals* 249, 14-24 (2019).
- 7 Xiaoqing Shi, Stuart A. Boden, *Frontiers of Nanoscience* 11, 563-594 (2016).
- 8 Shi, X., Prewett, P., Huq, E., Bagnall, D. M., Robinson, A. P. G., & Boden, S. A., *Microelectronic Engineering* 155, 74–78 (2016).
- 9 N.R. Guseinov, M.M. Muratov, M.T. Gabdullin, R.R. Nemkayeva, M.M. Myrzabekova, Ya.L. Shabelnikova, S.I. Zaitsev, 5th Intern. Sc. Conf. "Modern Problems of Condensed Matter Physics, Nanotechnology and Nanomaterials", (Almaty, 17-18 May, 2018), p.193-194. (in Russ).
- 10 Scott Hector, *AIP Conference Proceedings* (2005), p. 359-368.
- 11 H.S. Kim, S. Ahn, D.W. Kim, Y.C. Kim, & S.J. Ahn, *Microelectronic Engineering*, 86, 2049–2052 (2009).
- 12 M.A. Mohammad, T. Fito, J. Chen, S. Buswell, M. Aktary, M. Stepanova, S.K. Dew, *Microelectronic Engineering* 87, 1104–1107 (2010).
- 13 M.M. Myrzabekova, S. Sarkar, G.A. Baigarinova, N.R. Guseinov, A.M. Ilyin, *Physical Sciences and Technology* 1, 4-9, (2014)
- 14 C. Vieu, F. Carcenac, A. Pepin, Y. Chen, M. Mejias, A. Lebib, L. Manin-Ferlazzo, L. Couraud, H. Launois, *Applied Surface Science* 164, 111-117 (2000).
- 15 D.M. Tennant and A.R. Bleier, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1-25 (2016).
- 16 P. Rai-Choudhury, *Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication*, (SPIE, 1997), 776.
- 17 K. Vutova, G. Mladenov, *Microelectronic Engineering* 57–58, 349–353 (2001).
- 18 M.M. Myrzabekova, N.R. Guseinov, M.M. Muratov, M.T. Gabdullin, R. R. Nemkayeva, T. Tolkyrbayeva, Ya.L. Shabelnikova, S.I. Zaitsev., *Proc. 6th Intern. Conf. on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS-2018)* (Almaty, August, 2018), p.84.
- 19 J. Samàa, G. Domènech-Gila, I. Gràciac, X. Borrisc, C. Cané, S. Barthd, F. Steibe, A. Waage, J.-D. Pradesa, A. Romano-Rodríguez, *Sensors and Actuators B*, 232, 402-409 (2019).
- 20 M.A. Knyazev, S.V. Dubonos, A.A. Svintsov, S.I. Zaitsev, *Microelectronic Engineering* 84, 1080–1083 (2007).