

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.38

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛИНЗЫ И УСЛОВИЙ ЕЕ ХРАНЕНИЯ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ ФОРМУ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Тищенко Л.А. *, Ковалев А.А. **, Чижиков С.В. ***

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1, Москва, 105005, Россия*

** e-mail: leonid.tichenko@gmail.com*

*** e-mail: kovalevarta@gmail.com*

**** e-mail: chigikov95@mail.ru*

Определены основные технологические операции изготовления кремниевой электронной линзы и их характеристики, оказывающие наибольшее влияние на ее основной электронно-оптический параметр — геометрическую форму сечения электронного пучка. Рассмотрено влияние условий хранения электронной линзы на отклонение геометрической формы сечения электронного пучка. Выявлены возможные причины увеличения со временем отклонения геометрической формы сечения электронного пучка, а также разработаны технологические рекомендации по технологическому процессу изготовления электронной линзы и условиям ее хранения для снижения скорости роста отклонения геометрической формы сечения электронного пучка.

Ключевые слова: электронно-лучевая (безмасочная) литография, кремниевая электронная линза, форма электронного пучка.

Введение

В современной микроэлектронике одной из ключевых операций технологического процесса изготовления большинства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем является операция литографии, от параметров которой зависят точность создания топологии изделий и, как следствие, их выходные характеристики. В частности, применяют оптическую, ультрафиолетовую, рентгеновскую, электронно-лучевую литографии. Преимуществами электронно-лучевой литографии по

сравнению с другими методами является возможность получать структуры с разрешением менее 10 нм, а также создавать приборные структуры на пластинах без использования шаблонов. Для увеличения производительности процесса электронно-лучевой литографии вместо одного электронного пучка используют тысячи параллельных электронных пучков: один пучок от мощного источника расщепляется на множество пучков, которыми затем управляют с помощью электростатических электронных линз. Для обеспечения необходимой точ-

ности создания топологического рисунка на полупроводниковой пластине необходимо, чтобы геометрическая форма сечения всех электронных пучков была круглой, отклонение от вертикали электронного пучка, проходящего через линзу, — минимальным. Перечисленные параметры являются основными электронно-оптическими характеристиками кремниевой электронной линзы, зависят от параметров технологического процесса ее изготовления и условий ее хранения, в том числе условий транспортировки.

Поскольку кремниевые электронные линзы используются в технологическом оборудовании многолучевой электронной литографии, то от их электронно-оптических параметров зависят точность создания топологии изделий и, как следствие, их выходные характеристики. Обеспечение заданных электронно-оптических параметров электронных линз (в том числе геометрической формы сечения электронных пучков) на этапе изготовления, при хранении и транспортировке, а также их повторяемости от партии к партии является актуальной проблемой.

Электронная линза и её электронно-оптические свойства

Электростатическая электронная линза — элемент, предназначенный для формирования пучков электронов, их фокусировки и создания электронно-оптических изображений объектов, используемый в установках безмасочной многолучевой электронной литографии [1].

Объектом исследования в данной работе является электронная линза, представляющая собой кремниевую пластину с множеством отверстий круглой формы. Исследуемая линза используется в технологическом оборудовании многолучевой электронной литографии для расщепления мощного пучка на множество пучков.

Рассматриваемый электронно-оптический параметр электронной линзы, от которого зависит точность создания топологии на пластине при литографии, — геометрическая форма сечения электронного пучка. Идеальная форма сечения электронного пучка — окружность — необходима для обеспечения фокусировки пучка с помощью электростатической линзы [2, 3]. При этом нормированная ошибка контура электронного пучка должна стремиться к 0.

Под нормированной ошибкой контура подразумевается отклонение формы пучка от идеальной формы (окружности), приведенное к единице.

По данным производителей технологического оборудования электронной многолучевой литогра-

фии, для обеспечения необходимой точности формирования топологического рисунка на пластине необходимо, чтобы электронная линза имела условную нормированную ошибку контура меньше 1. При этом наблюдается изменение со временем ошибки контура уже изготовленной линзы (в течение ее длительного хранения).

Выявление причин увеличения со временем ошибки контура электронной линзы, а также разработка методов их устранения — основная задача данной работы; второй задачей является максимально возможное уменьшение начальной ошибки контура электронной линзы (после ее изготовления).

Определим технологические операции, наиболее сильно влияющие на геометрическую форму сечения электронного пучка.

Технологические операции изготовления кремниевой электронной линзы, имеющие наибольшее влияние на ее электронно-оптические свойства

По результатам экспертной оценки техпроцесса изготовления электронной линзы был предварительно выявлен ряд следующих операций, которые могли бы повлиять на ошибку контура линзы, а именно:

— операция оксидирования (так как на непроводящем слое оксида кремния может накапливаться заряд, вследствие чего может создаться достаточно сильное электростатическое поле, которое могло бы повлиять на форму электронного пучка);

— операция химической очистки (так как происходит травление слоя оксида кремния, а значит, и снятие заряда с пластины).

Также на ошибку контура линзы могут влиять условия хранения и транспортировки пластин, в частности между операциями химической очистки и контролем электронно-оптических свойств линзы (так как происходит рост естественного оксида, на поверхности которого может накапливаться заряд, вследствие чего может создаться электростатическое поле, способное повлиять на форму электронного пучка).

Оборудование, используемое для измерения выходных параметров электронной линзы

Для измерения электронно-оптических параметров электронной линзы используют специализированные метрологические системы.

Ошибку контура (отклонение формы электронного пучка от округлости) измеряют на специализированном оборудовании в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 1. Процесс измерения ошибки контура во многом схож с тех-



Рис. 1. Структурная схема измерения ошибки контура на специализированном оборудовании

нологической операцией многолучевого электронного экспонирования и состоит в следующем. Создается мощный электронный пучок, который, проходя через коллиматор (электростатическая линза, фокусирующая электроны так, чтобы получался широкий параллельный пучок электронов), а затем через матрицу отверстий (рассматриваемый объект), разделяется на множество пучков. Затем пучки попадают на YAG-экран (алюмоиттриевый гранат, сцинтилляционный материал), при этом фиксируется изображение сечения каждого про-

шедшего через линзу электронного пучка и определяется отклонение формы сечения этого пучка от округлости [4].

Исследование влияния операции оксидирования на форму сечения электронного пучка

В соответствии с выдвинутым ранее предположением операция оксидирования может существенно влиять на форму сечения электронного пучка. При данной операции на всей поверхности пластины образуется диэлектрический слой оксида кремния толщиной порядка 250 нм, на котором может накапливаться электростатический заряд [5,6]. В результате этого создается электростатическое поле, способное повлиять на форму сечения электронного пучка. На основании этого было предположено, что оксид кремния может существенно повлиять на форму сечения электронного пучка.

Для проверки этого предположения была проведена серия экспериментов, в которых рассматривалось изменение формы сечения пучка непосредственно до оксидирования, непосредственно после оксидирования и спустя одну неделю после оксидирования для нескольких пластин (пластины хранились при атмосферном давлении). Результаты экспериментов представлены на рис. 2–5.

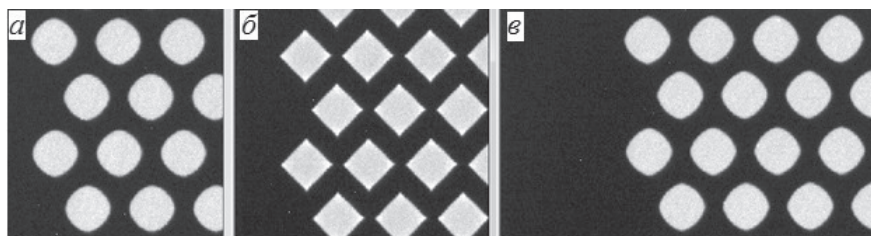


Рис. 2. Сечение электронных пучков до (а), после (б) и через одну неделю (е) после операции оксидирования образца №1

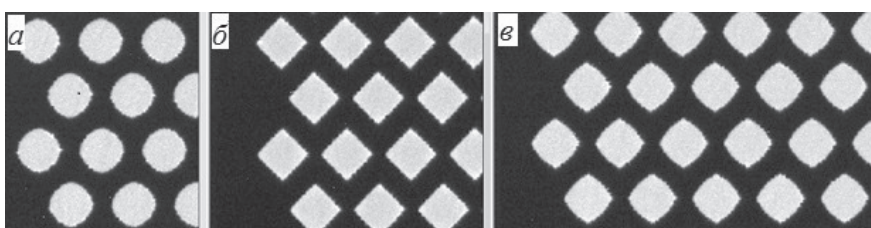


Рис. 3. Сечение электронных пучков до (а), после (б) и через одну неделю (е) после операции оксидирования образца №2

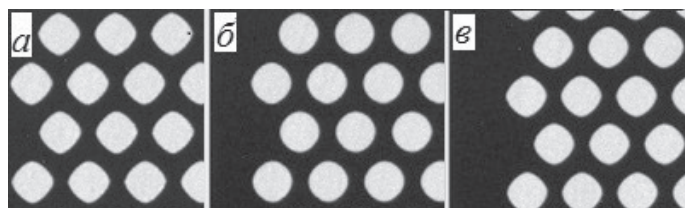


Рис. 4. Сечение электронных пучков до (а), после (б) и через одну неделю (е) после операции оксидирования образца №3

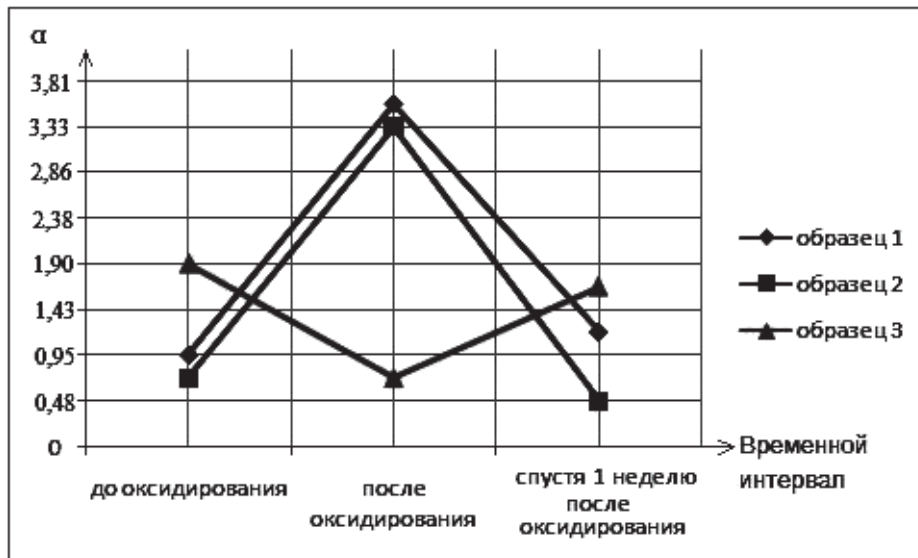


Рис. 5. График изменения ошибки контура

Ошибку контура можно оценить качественно, она будет минимальна у пучка, сечение которого максимально приближено к окружности. Таким образом, например, анализируя полученные данные, можно заметить, что для образцов №1, 2 (см. рис. 2 и 3) оксид сильно увеличил ошибку контура, так как форма пучка стала вместо круглой ромбической, а для образца №3 (см. рис. 4) оксид уменьшил ошибку контура, так как сечение пучка после оксидирования стало более приближенным к круглой форме, чем до оксидирования.

Из анализа полученных данных было сделано несколько выводов: во-первых, операция оксидирования пластины существенно влияет на форму сечения электронного пучка и, как следствие, на ошибку контура; во-вторых, со временем (спустя неделю) форма сечения электронного пучка так или иначе изменяется, увеличивая или уменьшая ошибку контура пучка. Можно заметить, что для образцов №1 и №2, у которых ошибка контура была довольно мала ($\alpha = 0,71 - 0,95$), после операции оксидирования ошибка контура существенно возросла ($\alpha = 2,86 - 3,81$), а у образца №3, у которого ошибка контура до операции оксидирования была довольно высокая ($\alpha = 1,67 - 2,14$), после операции оксидирования стала близка к идеальной ($\alpha = 0,48 - 0,71$). Однако спустя неделю у образцов №1 и №2 ошибка контура уменьшилась на 50–80%, а у образца №3 наоборот — опять возросла до значения, равного значению до операции оксидирования.

Для удаления слоя оксида кремния с поверхности пластины и, как следствие, уменьшения ошибки контура (так как происходит снятие заряда с поверхности пластины, способного повлиять на форму сечения электронного пучка) применяют операцию химической очистки пластины, после

которой проводят операцию контроля параметров электронной линзы. Однако при длительном промежутке времени между этими операциями на пластине может сформироваться пленка естественного оксида [7], которая способна повлиять на форму сечения электронного пучка, как при процессе оксидирования. Для предотвращения этого возможно введение дополнительной химической очистки непосредственно перед измерением электрооптических параметров линзы.

Удаление оксидной пленки с поверхности пластины происходит при ее химической очистке, причем различные химические реагенты по-разному взаимодействуют с поверхностью образца. Эллипсометрические данные показывают, что толщина оксида на поверхности пластины после ее обработки водным раствором HF крайне мала. Это свидетельствует о том, что водный раствор HF хорошо удаляет оксид и травление останавливается перед самой поверхностью кремния. Химическая же обработка водным раствором NH_4OH обеспечивает тонкий «химический» оксид, препятствующий дальнейшему росту естественного оксида [8].

Таким образом, было предположено, что химический состав травителей влияет на образование естественного оксида кремния, который, в свою очередь, воздействует на форму сечения электронного пучка.

Исследование влияния химического состава травителей на образование естественного оксида кремния и влияния SiO_2 на форму сечения электронного пучка

В предположении, что изменение контура пучка связано с ростом естественного оксида, был проведен эксперимент с тремя образцами, в котором

рассматривалось изменение формы сечения электронного пучка в следующие моменты времени: непосредственно после изготовления образца, спустя шесть недель после изготовления образца и непосредственно после проведения химических очисток образцов с различным составом травителей (пластины хранились при атмосферном давлении).

Для образца №4 была проведена полная химическая очистка (Triton, HF, SC-1, ИПС). Ошибки контура: непосредственно после изготовления, спустя шесть недель после изготовления и непосредственно после химической очистки образца соответственно равны 1,19; 3,05 и 0,76 (рис. 6).

Из рис. 6 для образца №4 можно заметить, что со временем ошибка контура пучка увеличивалась (форма пучка становилась вместо круглой ромбической), что, вероятно, связано с образованием («наростом») оксида кремния, а после проведения очистки — уменьшилась.

Для образца №5 была проведена очистка (Triton, HF, ИПС). Ошибки контура непосредственно пос-

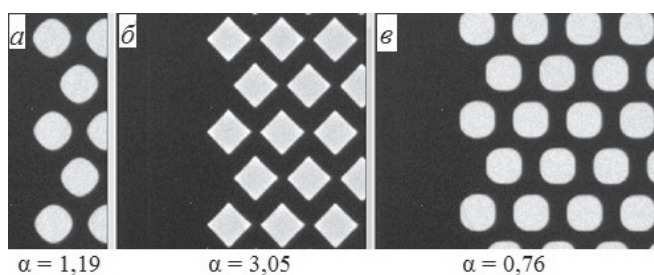


Рис. 6. Сечение электронных пучков непосредственно после изготовления (а), спустя шесть недель после изготовления (б) и непосредственно после очистки (е) образца №4

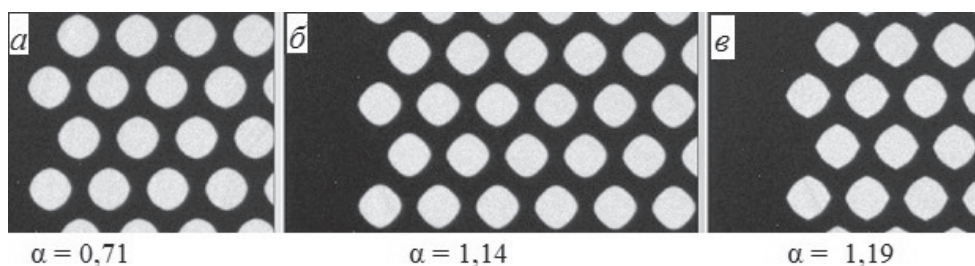


Рис. 7. Сечение электронных пучков непосредственно после изготовления (а), спустя шесть недель после изготовления (б) и непосредственно после очистки (е) образца №5

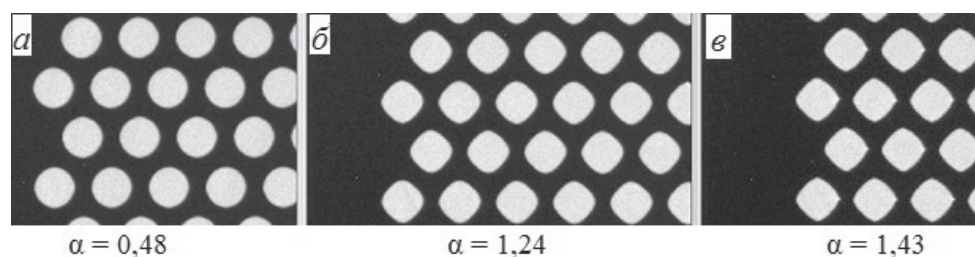


Рис. 8. Сечение электронных пучков непосредственно после изготовления (а), спустя шесть недель после изготовления (б) и непосредственно после очистки (е) образца №6

ле изготовления, спустя шесть недель после изготовления и непосредственно после химической очистки образца соответственно равны 0,71; 1,14 и 1,19 (рис. 7).

Для образца №6 была проведена очистка (HF, ИПС). Ошибки контура непосредственно после изготовления, спустя шесть недель после изготовления и непосредственно после химической очистки образца соответственно равны 0,48; 1,24 и 1,43 (рис. 8).

Из рис. 7 и 8 для образцов № 5, 6 также видно увеличение со временем ошибки контура, однако химическая очистка в данных случаях не привела к изменению формы пучка, как в случае для образца №4 (см. рис. 6).

Спустя две недели после проведения последнего эксперимента (последней очистки элемента) были снова определены ошибки контуров образцов №4,5,6 (рис. 9—11), при этом образцы хранились на воздухе при атмосферном давлении.

Из рис. 9 для образца №4 опять же видно, что со временем форма пучка становилась ромбической, следовательно, ошибка контура пучка увеличивалась, что связано с образованием («наростом») оксида кремния, причем после проведения повторной очистки ошибка контура не уменьшилась.

Из рис. 10 и 11 для образцов №5,6 видно, что с течением времени сечение пучка принимало круглую форму, вследствие чего ошибка контура для образцов значительно уменьшилась.

На рис. 12 показан график изменения ошибки контура для образцов со временем после проведения различных операций.

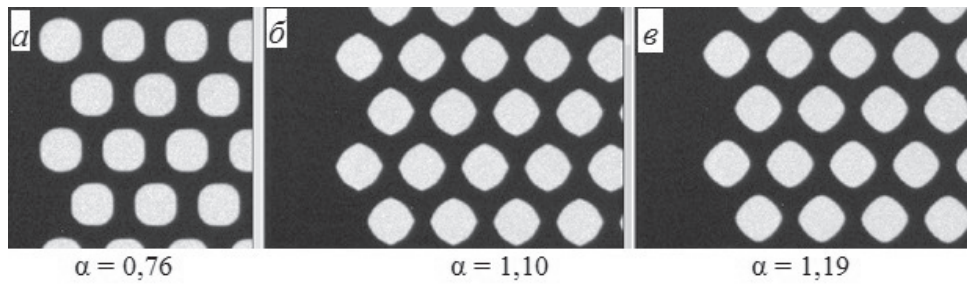


Рис. 9. Сечение электронных пучков после проведения первой очистки (а), спустя две недели после первой очистки (б), после второй очистки (в) образца №4

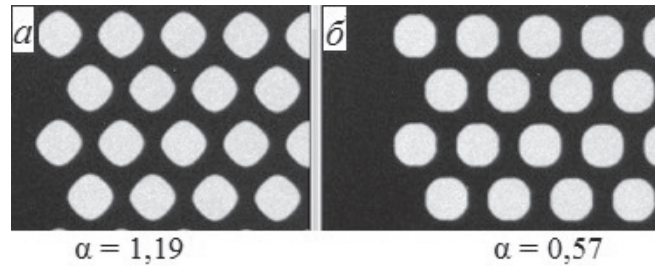


Рис. 10. Сечение электронных пучков после проведения очистки (а), спустя две недели после очистки (б) образца №5

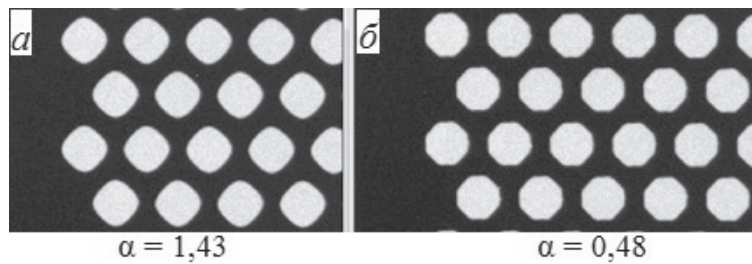


Рис. 11. Сечение электронных пучков после проведения очистки (а), спустя две недели после очистки (б) образца №6

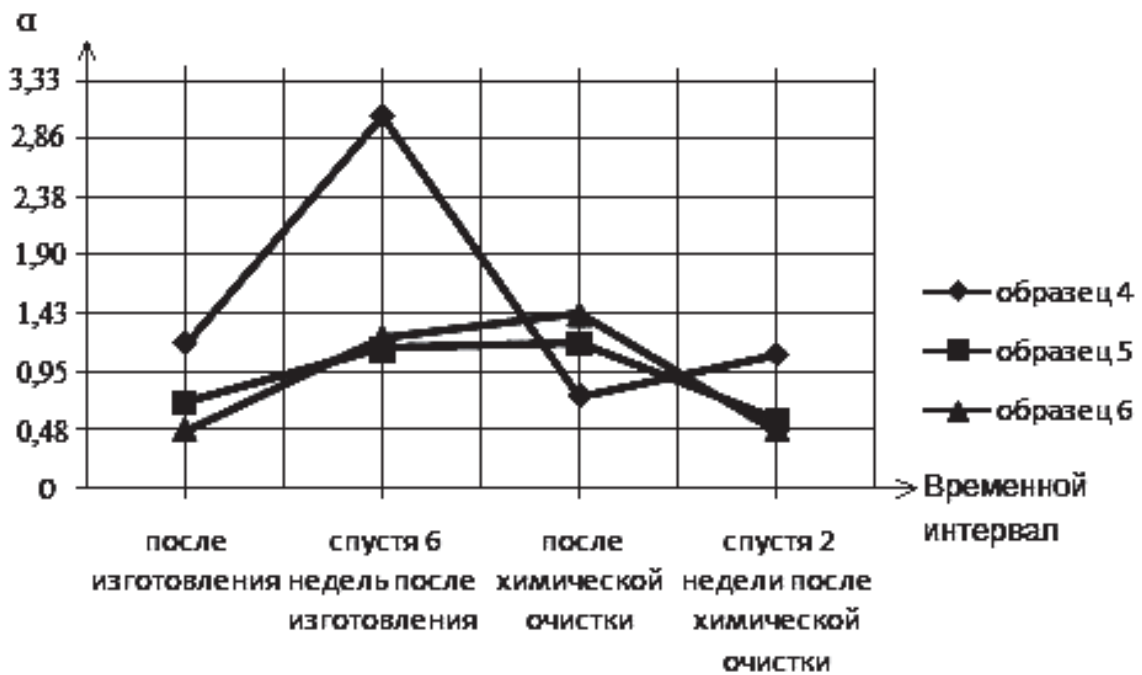


Рис. 12. График изменения ошибки контура со временем

Таким образом, было установлено, что химический состав травителей влияет на образование естественного оксида кремния на пластине и естественный оксид значительно влияет на форму сечения электронного пучка и, как следствие, на ошибку контура.

Согласно [7] естественный оксид образуется на поверхности кремния в присутствии кислорода и воды, его рост можно заметно уменьшить при помещении кремниевой пластины в вакуум, а значит, должна снизиться скорость роста ошибки контура со временем, связанной с образованием естественного оксида на поверхности.

Исследование влияния условий хранения линзы на изменение формы электронного пучка

Для проверки предположения о влиянии скорости роста естественного оксида на изменение формы электронного пучка образец №6 ($\alpha = 0,48$) был помещен в вакуумную упаковку относительно образца №5, так как ошибки контура образцов №5 и №6 почти схожи (0,57 и 0,48 соответственно); образцы №4 и №5 хранились при атмосферном давлении. Спустя две недели были снова определены ошибки контуров образцов. Результаты представлены на рис. 13–16.

Также были получены эллипсометрические данные по толщине SiO₂ на поверхности образцов (см. таблицу).

Из полученных результатов можно сделать вывод, что вакуумная упаковка снижает скорость ро-

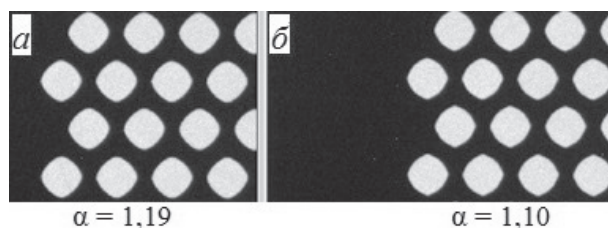


Рис. 13. Сечение электронных пучков спустя две недели после очистки (а), спустя четыре недели после очистки (б) образца №4

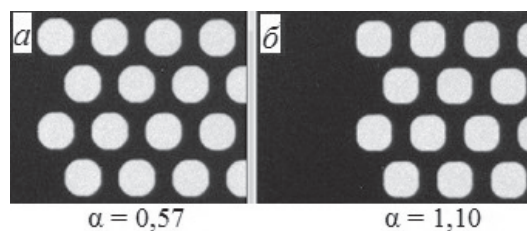


Рис. 14. Сечение электронных пучков спустя две недели после очистки (а), спустя четыре недели после очистки (б) образца №5

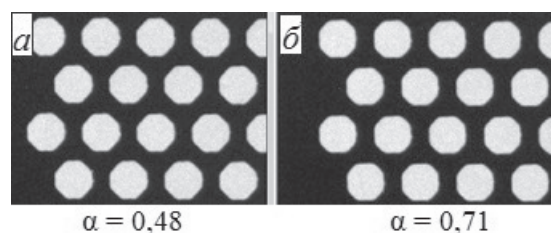


Рис. 15. Сечение электронных пучков спустя две недели после очистки (а), спустя четыре недели после очистки (б) образца №6

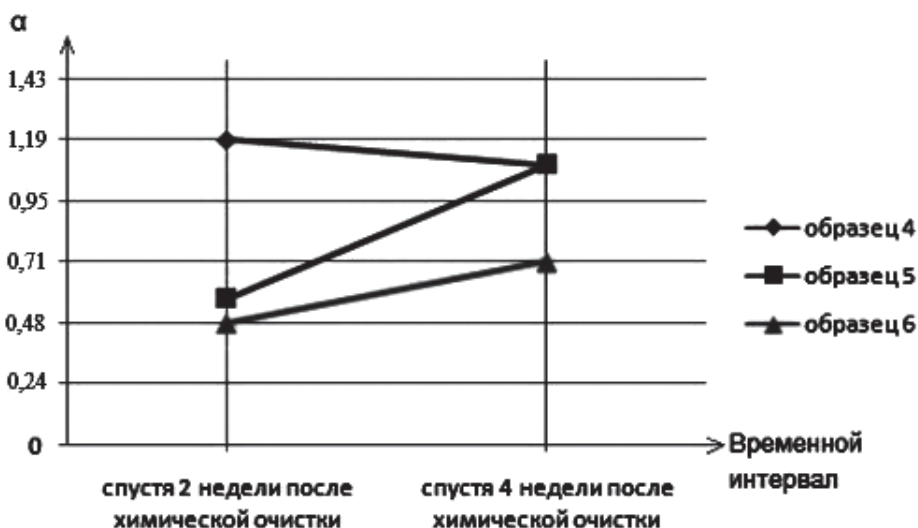


Рис. 16. График изменения ошибки контура со временем

Измеренные значения средней толщины оксида кремния на поверхности образцов

Образец	№4	№5	№6
Средняя толщина по пяти измерениям, нм	0,940	0,959	0,871

ста природного оксида на поверхности пластины (сравнивая данные по средней толщине оксида кремния из таблицы для образцов №5 и №6: $0,959 > 0,871$ нм) и снижает скорость роста ошибки контура электронного пучка (изменение ошибки контура пучка $\Delta\alpha = 0,53$ (без вакуума), изменение ошибки контура пучка $\Delta\alpha = 0,23$ (в вакууме)).

Выводы

В ходе данной работы были выявлены следующие возможные причины увеличения со временем ошибки контура электронного пучка: рост природного оксида на кремниевой пластине и накопление в нем электростатического заряда, вследствие чего образуется электростатическое поле, способное изменить форму сечения электронного пучка. Для снижения скорости роста ошибки контура электронного пучка были разработаны следующие технологические рекомендации:

— уменьшение времени между химической очисткой линзы и контролем электронно-оптических свойств линзы (для уменьшения толщины нарастаемого естественного оксида кремния);

— применение вакуумных упаковок (для уменьшения скорости роста природного оксида);

— проведение дополнительной химической очистки (для удаления природного оксида кремния).

Для дальнейшего поиска прочих методов устранения причин ухудшения со временем электронно-оптических параметров электронной линзы (в течение ее длительного хранения) планируется рассмотреть применение ионизатора для снятия электростатического напряжения с пластины, использование ультразвука при смывке реагентов (для их полной смывки с поверхности, в том числе из от-

верстий) в процессе химической очистки пластины и применение другой концентрации веществ в растворе SC-1 при химической очистке пластин.

Библиографический список

1. Баранова Л.А., Явор С.Я. Электростатические электронные линзы. — М.: Наука, 1986. — 196 с.
2. Бимурзаев С.Б., Трубицын А.А., Магзом М.М. К теории фокусировки удаленных от оси пучков заряженных частиц в электростатических полях осевой симметрии // Вестник АУЭС. 2012. № 4. С. 46-52.
3. Гликман Л.Г., Голоскоков Ю.В. Об одном классе электростатических полей, идеально сохраняющих параллельность плоских однородных пучков заряженных частиц // Журнал технической физики. 2000. Т. 70. № 1. С. 72-75.
4. Быков В.А., Борисов К.Ю., Быков Ал.В., Быков Ан.В., Котов В.В., Шиллер В.А. Технологические комплексы наноэлектроники с использованием систем бесшаблонной литографии // Интеграл. 2013. № 3. С. 76-82.
5. Гуськова О.П., Воротынцев В.М., Шоболов Е.Л., Абросимова Н.Д. Влияние германия, имплантированного в структуру «диоксид кремния на кремнии», на процессы накопления заряда при воздействии низкоэнергетического стационарного ионизирующего излучения // Материалы электронной техники. 2012. № 4. С. 28-32.
6. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Исследование экранирующих свойств гибких материалов с целью их дальнейшего применения для защиты изделий аэрокосмической техники от электромагнитных воздействий // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т.18. № 1. С. 121-125.
7. Sukumar Basu. Crystalline Silicon — Properties and Uses, InTech. URL: <http://www.intechopen.com/books/crystalline-silicon-properties-and-uses>
8. Werner Kern. Semiconductor wafer cleaning technology. — New Jersey, Noyes Publications, 1993. — 634 p.

BASIC PROCESS OPERATIONS PARAMETERS IMPACT OF SILICON ELECTRONIC LENS MANUFACTURING AND ITS STORAGE CONDITIONS EFFECT ON ELECTRON BEAM SHAPE STUDYING

Tischenko L.A.^{*}, Kovalev A.A.^{**}, Chizhikov S.V.^{***}

Moscow state technical university named after N.E. Bauman,
MSTU, 5/1, 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia

* e-mail: leonid.tichenko@gmail.com

** e-mail: kovalevarta@gmail.com

*** e-mail: chigikov95@mail.ru

Abstract

Lithographic processing is one of the key operations of technological processes while semiconductor devices and integrated circuits manufacturing. Its parameters

effect strongly the precision of the devices' structure creation, and, as a consequence, its output characteristics. Multi beam lithography is implemented in particular. Its technological equipment uses silicon

electronic lenses for electron beam control, which electronic and optical parameters affect the accuracy of the manufactured product structure and, as consequence, their output characteristics.

The paper tackles the topical problem of ensuring the specified electro-optical parameters of electrostatic lens (including geometric sectional shape of electron beam) during its production, storage, and transportation, as well as repeatability of these parameters from batch to batch.

The research object of this project is electro-static lens representing silicon plate with a plenty of holes of circular shape. The lens under study is used in technological equipment for multi-beam e-lithography for a powerful beam splitting into a multitude of beams.

The electro-static lens parameters degradation causes in length of time identification, and their elimination technique development are the main tasks of this studies.

In the course of the study, a number of operations and factors that could affect the electro-optical lens parameters was revealed. According to the results of expert evaluation of electronic lens manufacturing technological process, these factors are oxidation and chemical cleaning operations.

The results of various technological operations and factors effect on electro-optical lens parameters variation were presented. While this research a series of experiments was conducted, which considered variation of electro-optical lens parameters in length of time.

The obtained results of the studies allowed revealing possible reasons of electro-static lens parameters degradation in length of time, and developing technological recommendations to prevent this degradation.

The plan of future studies is presented.

Keywords: electron-beam (maskless) lithography, silicon electrostatic lens, electron beam shape.

References

1. Baranova L.A., Yavor S.Ya. *Elektrostaticheskie elektronnyye linzy* (Electrostatic electron lenses), Moscow, Nauka, 1986, 196 p.
2. Bimurzaev C.B., Trubitsyn A.A., Magzom M.M. *Vestnik AUES*, 2012, no. 4, pp. 46-52.
3. Glikman L.G., Goloskokov Yu.V. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2000, vol. 70, no. 1, pp. 72-75.
4. Bykov V.A., Borisov K.Yu., Bykov Al.V., Bykov An.V., Kotov V.V., Shiller V.A. *Integral*, 2013, no. 3, pp. 76-82.
5. Gus'kova O.P., Vorotyntsev V.M., Shobolov E.L., Abrosimova N.D. *Materialy elektronnoi tekhniki*, 2012, no. 4, pp. 28-32.
6. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 121-125.
7. Sukumar Basu. Crystalline Silicon - Properties and Uses, *InTech*, available at: <http://www.intechopen.com/books/crystalline-silicon-properties-and-uses> (accessed 16.11.2016).
8. Werner Kern. *Semiconductor wafer cleaning technology*, New Jersey, Noyes Publications, 1993, 634 p.