

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
начальник управления научной политики

Профессор Федянин А.А.



А.А. Федянин

15 2021 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Шишлянникова Антона Валерьевича «Исследование методов формирования структур с критическими размерами до 10 нм электронно-лучевой литографией на основе HSQ резиста», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Уменьшение линейных размеров элементов микросхем является основным способом увеличения производительности и эффективности в микроэлектронике. В связи с этим существует необходимость создания структур на чипах с элементами нанометровых размеров, которые широко востребованы в таких областях промышленности как: оптоэлектроника, функциональная и интегральная электроника, производство логических микросхем, средств беспроводной передачи информации, микробиология, производство военной техники и т.д.

В связи с этим становится актуальным вопрос о разработке таких технологий. Альтернативой литографии на основе глубокого ультрафиолета, основному инструменту формирования нанометровых структур, является электронно-лучевая литография (ЭЛЛ). Преимуществом ЭЛЛ является высокое разрешение, а также прямая запись на пластину без использования фотошаблонов, цена комплекта которых чрезвычайно высока, а также гибкостью процесса относительно топологии, чтобы исключить затраты на производство фотомасок для каждого конкретного изделия.

Объектом изучения данной диссертации являются основные факторы, влияющие на формирование структур высокого разрешения методом электронно-лучевой литографии с использованием электронного резиста на основе водород-силсесквиоксана HSQ – резиста,

позволяющего формировать изолированные линии с критическим размером в единицы нанометров. Исследование влияния температуры проявления как на контраст резиста, так и на шероховатость края экспонируемых линий является комплексным решением проблемы достижения максимального разрешения. Анализ селективности резиста в процессах анизотропного плазмохимического травления позволяет заключить о возможности использования HSQ как маска с целью получения высокоаспектных структур. Полученные результаты обуславливают высокую актуальность диссертационной работы и представляют значительный интерес для микроэлектронной отрасли.

Диссертационная работа Шишляникова А.В. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении рассматриваются актуальность темы исследований, формулируются цели и задачи диссертационной работы, основные положения, выносимые на защиту, обосновываются научная новизна и практическая значимость работы. Приводятся сведения о личном вкладе автора, апробации результатов (доклады на конференциях), публикациях в рецензируемых журналах, описывается структура и объём диссертации.

Первая глава представляет собой обзор научной литературы по теме диссертационной работы. Описываются результаты исследований по части усиления контраста различных резистов, рассматривается параметр шероховатости края линии, его роль при формировании топологии. Рассматриваются процессы переноса рисунка в нижележащий слой методом плазмохимического травления, описаны параметры используемой плазмы в зависимости от функционального слоя, а также возможные дефекты, возникающие при травлении.

Во второй главе приводится описание экспериментального оборудования и методы измерений. Приведены параметры технологического оборудования – установок электронно-лучевой литографии и плазмохимического травления; используемого в работе диагностического оборудования сканирующего электронного микроскопа и атомно-силового микроскопа, а также программного обеспечения для оценки шероховатости края линии и коррекции влияния эффекта электронной близости.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию влияния температуры проявления на формирование рисунка в HSQ резисте. Было показано, что температура проявления является фактором, способствующим усилению показателя контраста резиста HSQ и уменьшению шероховатости края. Было продемонстрировано более чем двукратное увеличение контраста при использовании отрицательной температуры проявления в -5 °С. Минимальное значение шероховатости края также наблюдалось при данной температуре. Отдельного замечания стоит обнаружение немонотонной зависимости контраста от

температуры проявления. Модификация метода проявления в растворе NaOH-NaCl позволила сформировать суб-10 нм группу плотных линий.

В четвертой главе представлены результаты по моделированию влияния эффекта электронной близости – одного из основных параметров, влияющих на максимальное разрешение электронной литографии, вызванного дополнительной засветкой близкорасположенных структур. Интегральная плотность поглощенной в резисте энергии, график которой был получен по результатам моделирования, позволяет заключить о наличии градиента на различной глубине резиста и расстоянии от оси пучка. Полученные данные позволяют компенсировать влияние эффекта близости с целью увеличения выдаваемого разрешения.

Пятая глава посвящена изучению плазмостойкости резиста HSQ в процессах анизотропного плазмохимического травления. Исследованы скорости травления как резиста, так и различных материалов: оксида алюминия, оксидов кремния и гафния, тантала, нитрида кремния, монокристаллического кремния в плазме различного состава. Продемонстрирована способность HSQ резиста выступать в роли маски с дальнейшим созданием структур с высоким аспектным отношением.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы.

Наибольшую **научную значимость** в данном диссертационном исследовании представляют следующие полученные в ней результаты:

1. Показатель контраста электронного резиста HSQ немонотонно зависит от температуры проявления в растворе NaOH-NaCl. Наблюдалось усиление контраста как при увеличении температуры, так и при уменьшении относительно комнатной.
2. Показано, что использование отрицательной температуры проявления -5°C способствует значительному усилению контраста HSQ и уменьшению шероховатости края экспонируемых линий, что влечет к увеличению выдаваемого резистом разрешения.
3. Изучена селективность резиста HSQ в механизмах анизотропного плазмохимического травления в зависимости как от состава плазма, так и от основных параметров травления, тем самым продемонстрировав возможность применения HSQ как маска при структурировании широкого спектра материалов, применяемых в нанoeлектронике.

Практическая значимость работы заключается в подробном исследовании дозовых характеристик резиста HSQ с целью усиления разрешения, а также его плазмостойкости в

процессах переноса топологии в нижний слой. Данные результаты могут найти применение при прототипировании любых наноразмерных структур.

Диссертация не лишена недостатков, среди которых необходимо отметить следующие:

1. На картинках АСМ измерения формы резиста после облучения и проявления видны особенности формообразования, при малых дозах облучения видна конусообразность, при больших дозах обнаруживается «гребешки» на краях тестовых элементов. Не сделана попытка объяснения обнаруживающихся особенностей формирования рельефов негативного резиста в процессах экспонирования и проявления, таких как немонотонное изменение контраста. Нет качественного объяснения изменения адгезивных свойств облученных областей.
2. Отсутствует зависимость скорости травления резистной маски и тантала для разных параметров травления в плазме C_4F_8/O_2 .
3. В диссертации отсутствует список сокращенных обозначений.

Сделанные замечания не снижают общей весьма высокой оценки работы.

Диссертация Шишлянникова А.В. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах (из списка ВАК и Scopus), докладывались на российских и международных конференциях. Диссертация и автореферат написаны хорошим и понятным языком. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

По объёму, научной и практической значимости полученных результатов, работа отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Шишлянников Антон Валерьевич несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Доклад по материалам диссертации был представлен на семинаре кафедры физической электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Зав. кафедрой физической электроники

физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова



В. С. Черныш

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1. т. 8(495)9392989.