

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Шишлянникова Антона Валерьевича «Исследование методов формирования структур с критическими размерами до 10 нм электронно-лучевой литографией на основе HSQ резиста», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Актуальность темы

Диссертационная работа Шишлянникова А.В. является научным исследованием по изучению основных характеристик электронного резиста HSQ, таких как разрешение, контраст, шероховатость края линии в зависимости от фактора температуры проявления, а также селективность при анизотропном травлении в зависимости от различных условий процесса травления.

Современная нанoeлектроника достигла величины критических размеров топологии элементов 10 нм и менее, что обеспечено, в первую очередь, возможностями литографии экстремального ультрафиолета (EUV). Однако применение подобного оборудования для целей исследования, изготовления прототипов новых приборов нанoeлектроники, является экономически неоправданным. Повсеместно для этих целей служит электронно-лучевая литография (EBL), обеспечивающая необходимое разрешение, и которая имеет также значительный потенциал для малосерийного производства, в особенности, в многолучевом варианте. При этом, в отличие от оптической EUV-литографии, электронно-лучевая литография, при рассмотрении ее в виде комплексной проблемы, включающей экспонирование, проявление резиста, практическое использование EBL-масок для создания приборных наноструктур, имеет свои характерные особенности. Поэтому тема диссертационной работы Шишлянникова А.В. является, несомненно, актуальной.

Содержание диссертационной работы

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, имеет объем в 114 страниц, включая библиографию из 114 наименований.

Первая глава диссертации является обзорной. Вторая посвящена описанию используемого оборудования. Основные результаты исследования изложены в главах 3, 4 и 5.

В обзоре приведен широкий спектр теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации, рассмотрены основные работы, посвященные усилению контраста различных резистов и в частности, на основе водород-силсесквиоксана (HSQ). Проанализировано влияние параметра шероховатости края экспонируемых линий на работу приборов нанoeлектроники и указаны пути минимизации шероховатости. Рассмотрено влияние эффекта электронной близости как одной из проблем при достижении максимального разрешения в электронно-лучевой литографии. Показано, что наилучшим методом компенсации данного эффекта является компьютерное моделирование с целью подбора оптимальных параметров экспонирования. Перенос топологии в функциональные слои нижележащих материалов осуществляется методом плазмохимического травления. Выявлены параметры, необходимые для сохранения анизотропии профиля, а также режимы плазмохимического травления.

Глава 2 посвящена описанию примененных в работе методов исследования и оборудования. Описаны основные параметры электронно-лучевого литографа Raith-150, сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Ultra55, атомно-силового микроскопа ACM Nanopics 2100, а также установки для плазмохимического травления Plasmalab Dual System 100. Помимо этого, представлено описание программного обеспечения «ProхуFn», используемого для моделирования влияния эффекта близости, и «LER&LWR Calculator» для измерения шероховатости края линии.

Глава 3 посвящена исследованию влияния температурного фактора на основные параметры HSQ резиста, такие как контраст и шероховатость края линии. Исследована зависимость контраста и шероховатости края от температуры проявления. Одним из интересных результатов диссертации является использование пониженных температур проявления. Стоит также отметить обнаруженную немонотонную зависимость контраста резиста HSQ от температуры. К основным результатам диссертации можно отнести формирование плотной группы линий с критическим размером 9 нм за счет коррекции метода высококонтрастного проявления.

В главе 4 представлено моделирование влияния эффекта близости, по результатам которого получена зависимость интегральной плотности поглощенной энергии от расстояния от оси электронного пучка для различной толщины пленки резиста, что в конечном итоге позволяет оптимизировать разрешающую способность резиста.

В главе 5 исследована плазмостойкость резиста HSQ в процессах анизотропного плазмохимического травления. Была исследована селективность HSQ по отношению к широкому спектру материалов, от диэлектриков до металлов. Выявлены основные параметры процессов травления, необходимых для сохранения анизотропии профиля. Продемонстрирована возможность применения данного резиста для создания различных приборов нанoeлектроники.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе.

Научная новизна работы

В диссертационной работе присутствует ряд новых научных результатов, среди которых наиболее интересными являются следующие:

1. Впервые продемонстрирована немонотонная зависимость контраста резиста HSQ от температуры проявления.
2. Использование пониженных температур проявления оказывается перспективным в плане усиления контраста более чем в 2 раза в сравнении с

комнатной температурой, а также способствует минимизации шероховатости края экспонируемых линий вплоть до 1-2 нанометров.

3. Исследование селективности резиста HSQ по отношению к ряду функциональных материалов в процессах анизотропного плазмохимического травления показало способность данного резиста выступать как маска при создании прототипов приборов нанoeлектроники, в частности факт достижения селективности $S=19$ по отношению к кремнию позволяет заключить возможность формировать высокоаспектные структуры.

Полученные соискателем результаты актуальны и представляют значительный интерес для создания приборных наноструктур.

Практическая значимость работы

Полученные результаты диссертационного исследования углубляют уровень знаний в области создания масок электронно-лучевой литографией высокого разрешения в последовательной цепочке: экспонирование – проявление резиста – подготовка проявленной маски – процесс переноса топологии маски в функциональный слой наноструктуры. Процессы изучены на примере резиста HSQ, однако подходы могут применяться и на других электронных резистах. Полученные новые результаты по плазмостойкости масок имеют большое практическое значение для прототипирования приборов нанoeлектроники при помощи электронной литографии.

Достоверность выводов и рекомендаций

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается использованием современных методов исследования, применением моделей и методик, построенных на общепризнанных физических теориях. Публикация результатов в ведущих профильных рецензируемых научных журналах и апробация работы на международных научных конференциях свидетельствуют о их достаточной обоснованности.

Замечания по диссертационной работе

После ознакомления с диссертационной работой приходится отметить определённые недостатки работы и в её изложении.

1. В обзоре диссертации приводятся исследования по контрасту и коррекции шероховатости края с применением различных резистов. Стоило привести их молекулярную структуру, а также более детально описать их свойства, чтобы в полной мере обосновывать изменение вышеуказанных параметров.

2. Замечание по оформлению касательно отсутствия списка сокращенных обозначений для более легкого восприятия текста.

3. В обзоре приведено описание метода высококонтрастного проявления резиста HSQ, примененного в данной работе. Стоило указать, какой контраст был получен в описанном исследовании для дальнейшего сравнения с данными по контрасту в работе соискателя.

4. Исследование влияния температуры проявления на топологию создаваемого рисунка в HSQ резисте проведено лишь для нескольких значений температур, причем наблюдается тенденция усиления контраста резиста и минимизации шероховатости края линии при понижении температуры, вследствие чего было бы резонно рассмотреть влияние температур ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на указанные выше параметры.

5. Основной массив работы основан на проявлении в водном растворе NaOH-NaCl. Рекомендуемый спецификацией раствор для проявления на основе тетраметиламмония ТМАН продемонстрировал меньший контраст в сравнении с проявлением в щелочи, однако только при повышенной температуре $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, комнатной и $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Резонно было бы провести исследование и для отрицательных температур для данного типа проявления.

6. Объяснение зависимости контраста резиста HSQ от времени проявления для температур $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, представленной на рис. 40 в тексте диссертации, не совсем понятно. Возможно, стоило в большей степени описать процессы, ответственные за проявление.

7. В положении на защиту (п. 4) указано, что по результатам моделирования удалось оптимизировать разрешающую способность в системе резист-пучок, однако не объяснено, как именно это удалось сделать.

8. В представленной на рис. 55 зависимости скорости травления резистной маски и оксида гафния от доли азота в составе плазмы наблюдается довольно большая погрешность измерения селективности, нижняя граница которой соответствует значению селективности при другой доле азота в плазме. Не объяснено, чем вызвана такая большая погрешность и действительно ли наблюдается увеличение селективности при увеличении концентрации азота.

9. Исследование проведено только для резиста HSQ. Данных по другим негативным или позитивным резистам в работе нет.

10. На рисунке 26 главы 2 приведена схема атомно-силового микроскопа Nanopics 2100, но ни на рисунке, ни в пояснениях к нему не приведен метод регистрации положения и состояния кантилевера. Не приведены, также, методов регистрации координат сканера в процессе сканирования, что не позволяет определить точность и оценить корректность получаемых результатов.

Тем не менее, перечисленные замечания и недостатки не снижают общий высокий уровень представленной диссертационной работы.

Общая характеристика работы

В целом, диссертационная работа Шишлянникова Антона Валерьевича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая содержит комплекс оригинальных и актуальных результатов и свидетельствует о высокой научной квалификации автора. Диссертация достаточно грамотно написана, хорошо иллюстрирована и аккуратно оформлена. Основные результаты работы опубликованы в пяти статьях (две из них – переводные версии) в журналах, индексируемых в ВАК и SCOPUS, прошли апробацию на многочисленных российских и международных научных конференциях. Диссертационная работа и научные публикации

подтверждают личный вклад диссертанта в разработку представленной научной проблемы. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Заключение

Диссертация Шишлянникова Антона Валерьевича «Исследование методов формирования структур с критическими размерами до 10 нм электронно-лучевой литографией на основе HSQ резиста» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. Диссертационная работа и автореферат соответствуют требованиям п. 9 положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (ред. от 21.04.2016), а сам автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент

Доктор технических наук, по специальности 05.27.01

почетный президент

ООО «НТ-МДТ Спектрум Инструментс»

01.11.2021

Подпись Быкова В.А. заверяю

Ученый секретарь к.ф.-м.н.

Рябоконе В.Н.



В.А. Быков

Почтовый адрес: 124460, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4922, д. 4 стр. 3, комната 25

Телефон: + 7 (499) 110-2050

Е-mail: info@ntmdt-si.ru

Наименование организации: ООО «НТ-МДТ»