

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию

Шишлянникова Антона Валерьевича

«Исследование методов формирования структур с критическими размерами до 10 нм электронно-лучевой литографией на основе HSQ резиста»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук

по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Диссертационная работа Шишлянникова А.В. посвящена проблемам достижения максимального разрешения при использовании электронного резиста HSQ с учетом параметров, определяющих дозовые характеристики резиста (контрастность), а также проблемам минимизации шероховатости края экспонируемой линии и влияния эффекта электронной близости, с дальнейшим изучением возможностей исследуемого резиста при переносе топологии рисунка в слои функциональных материалов.

Достигнутые в современной нанoeлектронике суб-10 нм критические размеры топологии обусловлены использованием литографии с применением глубокого ультрафиолета. Преимущества электронно-лучевой литографии заключаются в достижении необходимого разрешения без использования крупных комплексов оборудования. Резист HSQ является одним из лучших с точки зрения достижения высокого разрешения литографии и используется в научно-исследовательских работах с широким спектром применения, от прямого формирования структур при создании оптических приборов до создания штампов в технологии наноимпринтинга. Высокое пространственное разрешение делает данный резист оптимальным в качестве маски в процессах сухого травления при переносе рельефа с высоким

разрешением в слой функционального материала. Таким образом, работа Шишлянникова А.В., посвященная исследованию характеристик резиста HSQ в процессе электронно-лучевой литографии и его сравнительной плазмостойкости к широкому кругу функциональных материалов является, несомненно, актуальной.

Диссертация Шишлянникова А.В. содержит 114 страниц, 55 рисунков и 1 таблицу, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников.

Диссертационная работа Шишлянникова А.В. направлена на исследование влияния фактора температуры проявления на основные параметры, влияющие на минимальный размер и максимальную плотность структур, реализуемых электронно-лучевой литографией – показатель контрастности резиста и шероховатость края экспонируемых линий. Также рассмотрены вопросы, связанные с коррекцией влияния эффекта электронной близости методом компьютерного моделирования. Исследования плазмостойкости резиста HSQ в процессах ПХТ позволяют заключить о возможности применения резиста при создании прототипов нанoeлектроники. Это актуальность представленной диссертационной работы для решения задач развития технологий микро- и нанoeлектроники.

Научные результаты, полученные автором диссертации, являются новыми и оригинальными и заключаются в следующем:

- Установлена немонотонная зависимость показателя контраста резиста HSQ от температуры проявления в водном растворе NaOH-NaCl (глава 3 диссертации). В плане усиления контраста перспективным оказывается использование как повышенных, так и пониженных температур относительно традиционной температуры 22 °С.
- Экспериментально показано, что температура проявления -5 °С позволяет достигнуть показателя контраста более чем в два раза больше традиционного (глава 3), что позволяет достигать меньших

размеров создаваемых структур и уменьшает влияние эффекта близости.

- Установлен подход по снижению шероховатости края экспонируемых в резисте линий (глава 3). Экспериментально продемонстрировано влияние температуры проявления на данный параметр. В совокупности с усилением контраста можно сделать вывод о комплексном решении задачи увеличения разрешения резиста, что в итоге позволило сформировать группу линий с критическими размерами 9 нм.
- Исследованы относительные скорости травления к большому списку функциональных материалов: монокристаллический кремний, слои металлического тантала и диэлектриков  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , а также пористого low-k диэлектрика на основе органосиликатного стекла, найдены режимы плазмохимического травления, оптимизирующие селективность анизотропного плазмохимического травления (глава 5).

Практическая значимость работы связана с достижением углубленного понимания физико-химических свойств резиста HSQ, процессов электронно-лучевого экспонирования, процессов плазмохимического травления с целью достижения предельно малых поперечных размеров при высоком аспектном отношении. Результаты работы могут использоваться при создании наномикро-приборов с чрезвычайно широкой областью применения: оптические метаматериалы, транзисторы на основе нанопроводов с огибающим затвором и др.

Представленную работу отличает высокая достоверность полученных результатов и сделанных выводов. Это достигается за счет использования проверенных методов технологии и грамотного анализа полученных результатов.

Основные результаты диссертации опубликованы в научных журналах, рецензируемых в ВАК и Scopus, доложены на российских и международных конференциях, уровень и количество публикаций соответствуют

требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в редакции Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 для кандидатских диссертаций.

Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает ее содержание.

В то же время необходимо отметить, что диссертация не свободна от недостатков.

В микро- и нанoeлектронике применяются не только негативные резисты, но и позитивные. Проведение изложенных в работе исследований не только для HSQ, но и для какого-либо позитивного резиста высокого разрешения позволило бы расширить спектр выполняемых электронной литографией задач.

Использование иностранных аббревиатур в тексте диссертации не всегда оправдано. Так в обзоре упоминается PSD – power spectral density, в то время как русское написание «спектральная плотность мощности» тоже часто применимо. «Notching» - дефект в процессах ПХТ: почему нельзя было использовать русскоязычный аналог данного слова?

Нижняя граница температуры проявления в экспериментах по изучению контраста и шероховатости края составляет  $-5^{\circ}\text{C}$ . Почему не были исследованы температуры ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ ?

Концентрация щелочи в водном растворе проявителя на основе NaOH-NaCl составляет 1%. Чем обусловлен выбор именно такого значения концентрации и почему нельзя ее уменьшить/увеличить?

На рис. 52(б) текста диссертации представлена зависимость селективности травления HSQ по отношению к Low-k диэлектрику, на которой наблюдается максимум селективности при низких давлениях при напряжении смещения 84-150 В. Действительно ли это максимум, или в пределах погрешности можно судить о неизменности селективности при указанных выше параметрах.



Тем не менее, указанные недостатки не умаляют в целом высокий уровень работы, которая содержит комплекс важных и оригинальных результатов и свидетельствует о высокой научной квалификации автора. Каждое положение, выносимое на защиту, по своему значению соответствует требованиям к кандидатским диссертациям, а выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, обоснованы и аргументировано подтверждены представленными теоретическим анализом и экспериментальными данными. Научная новизна работы Шишлянникова А.В. состоит в решении задачи, имеющей существенное значение для знаний в области нанoeлектроники.

Представленная диссертация, публикации, объем научных и практических результатов и качество их апробации позволяют сделать вывод, что работа является научно-квалификационной, правильно отражает суть исследований, свидетельствует о личном вкладе автора в науку и отвечает требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах. Автор диссертации – Шишлянников Антон Валерьевич – достоин присуждения ему искомой степени кандидата наук.

к.ф.-м.н.

Зайцев С.А.

по специальности 01.04.08 – физика плазмы

03.11.2021