

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт  
молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»)

На правах рукописи

**ШИШЛЯННИКОВ АНТОН ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР С  
КРИТИЧЕСКИМИ РАЗМЕРАМИ ДО 10 НМ ЭЛЕКТРОННО-  
ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИЕЙ НА ОСНОВЕ HSQ РЕЗИСТА**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук

Москва 2021



## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Обоснованность и актуальность темы исследования**

Безмасочная электронно-лучевая литография позволяет достичь нанометрового разрешения для отдельных линий, а также может быть использована для создания элементов наноразмерных устройств, поэтому перспективы развития данного метода в настоящее время особенно актуальны, в частности для создания прототипов наноразмерных транзисторов интегральных схем. В последние годы все чаще наблюдается использование электронно-лучевой литографии в качестве наиболее перспективного метода формирования нанометровых топологических элементов полупроводниковых структур, который может быть с успехом использован при изготовлении критических элементов плазмонных устройств,  $\text{fin}$  транзисторов, приборов молекулярной электроники, приемников ТГц-диапазона и других. В частности, в настоящее время безмасочная электронно-лучевая литография становится всё более привлекательным, наименее затратным решением, которое позволяет быстро освоить технологии формирования суб-нанометровых размеров топологических элементов и применить их при разработке устройств микро- и наноэлектроники.

Также стоит выделить потенциальные преимущества использования электронного резиста на основе водород-силсесквиоксана HSQ, который позволяет, ввиду своего сверхвысокого разрешения, формировать изолированные структуры с критическими размерами 7-8 нм.

На основе вышеизложенного анализа можно сделать вывод, что интерес со стороны научного сообщества к применению электронно-лучевой литографии при создании наноразмерных топологических элементов структур является особенно актуальным и неуклонно растет ввиду ее сверхвысокого разрешения и низких финансовых затрат в сравнении с иммерсионной литографией и литографией на основе глубокого ультрафиолета, что подтверждается тенденцией публикуемых работ в данной области. Поэтому исследование процессов электронной литографии высокого разрешения, представляющей цель исследования, является актуальной задачей и определяет развитие технологии

создания опытных приборов нанoeлектроники и имеет перспективы малосерийного производства специальных схем.

### **Цель работы**

Исследование и разработка базовых технологических принципов создания периодических структур с высокой плотностью топологических элементов с критическими размерами до 10 нм в кремнии на основе электронного резиста HSQ с использованием электронно-лучевой литографии с дальнейшей возможностью создания прототипов перспективных приборов нанoeлектроники.

Для достижения цели сформулированы следующие **задачи**:

- достижение предельного разрешения в HSQ резисте за счет улучшения контраста резиста путем вариации параметров проявления (использование повышенных и пониженных температур проявления в сравнении с традиционной температурой);
- минимизация шероховатости края экспонируемых линий в резисте в зависимости от параметров проявления (использование повышенных и пониженных температур проявления в сравнении с традиционной температурой);
- компьютерное моделирование влияния эффекта близости с целью оптимизации разрешающей способности в системе резист-пучок;
- исследование селективности резиста HSQ в анизотропных технологических процессах передачи рисунка маски в различные функциональные слои материалов, применяемых в нанoeлектронике.

### **Научная новизна**

1. Разработана методика повышения разрешающей способности и уменьшения шероховатости края экспонируемых линий в резисте HSQ.
2. Температура проявления электронного резиста HSQ является дополнительным фактором, позволяющим управлять контрастом резиста. Наблюдалось максимальное увеличение значения контраста более чем на 100% относительно традиционной температуры проявления. При этом впервые установлена немонотонная зависимость величины контраста от температуры проявления.

3. Использование пониженных температур проявления от  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  резиста HSQ способствует уменьшению критического размера экспонируемых структур при фиксированной дозе облучения в сравнении с традиционной температурой, а также способствует минимизации шероховатости края экспонируемых линий.
4. Проведено моделирование влияния эффекта электронной близости, получены значения коэффициентов, входящих в трехмерную функцию близости, что в дальнейшем можно учитывать при экспонировании структур. Показано, что в интересующем диапазоне критических размеров 10-22 нм плотность поглощенной энергии электронов в резисте ( $G(r,z)$ ) имеет заметный градиент по радиусу от оси пучка, что позволяет оптимизировать разрешающую способность в системе резист-пучок.
5. Исследование селективности анизотропного плазмохимического травления различных функциональных материалов (монокристаллический кремний, слои металлического Ta и слои 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, нанесенных на кремниевые подложки), по отношению к негативному электронному резисту на основе водород-силсесквиоксана HSQ показало, что резист HSQ может применяться для создания прототипов приборов нанoeлектроники с критическими размерами до 10 нанометров, и аспектными отношениями до 1:10 при структурировании широкого спектра материалов.

#### **Практическая значимость работы**

Были определены детали маршрута формирования маски и переноса изображения при создании периодических структур с высокой плотностью топологических элементов с критическими размерами до 10 нм в кремнии, что впоследствии может быть применено при прототипировании приборов нанoeлектроники.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Температура проявления электронного резиста на основе водород-силсесквиоксана HSQ является дополнительным фактором, позволяющим

управлять контрастом резиста. При этом контраст немонотонно зависит от температуры проявления.

2. Проявление резиста HSQ при пониженных температурах от  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  способствует усилению контраста резиста. Показатель контрастности  $\gamma$  составил  $12 \pm 1,7$ , что более чем на 100% выше показателя контраста ( $\gamma=5,4$ ) при температуре проявления, указанной в спецификации резиста.

3. Пониженные температуры проявления от  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  резиста HSQ способствуют уменьшению критического размера экспонируемых структур при фиксированной дозе облучения в сравнении с температурой, рекомендуемой спецификацией, а также способствуют минимизации шероховатости края экспонируемых линий.

4. Плотность поглощенной энергии электронов в резисте имеет заметный градиент по радиусу от оси пучка электронов, что позволяет оптимизировать разрешающую способность в системе резист-пучок.

5. Резист на основе водород-силсесквиоксана HSQ может применяться как маска для создания прототипов приборов нанoeлектроники с критическими размерами до 10 нанометров и менее при структурировании широкого спектра материалов – монокристаллический кремний Si, слои металлического Ta и диэлектриков  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , пористого low-k диэлектрика OSG, обладая селективностью в анизотропных плазмохимических процессах до 1:10.

**Достоверность** полученных результатов и выдвигаемых на защиту научных положений обеспечивается использованием современных методов исследования, общепризнанных физических теорий и общеизвестных экспериментальных методик. Результаты работы были доложены на международных конференциях.

**Личный вклад автора:** автором были проведены экспериментальные исследования по экспонированию образцов на электронно-лучевом литографе с последующим проявлением в химических растворах, их анализ с применением сканирующего электронного микроскопа, а также обработка полученных результатов с использованием различного программного обеспечения. Автором была предложена методика проявления экспонированных структур в резисте

HSQ при пониженных температурах в водном растворе 1% NaOH и 4% NaCl. Данный подход способствовал значительному усилению контраста используемого резиста в сравнении с традиционной температурой проявления, минимизации шероховатости края линий экспонированных структур и критических размеров формируемых элементов. Автором была решена задача по моделированию влияния эффекта близости при экспонировании, в ходе которой определены параметры, входящие в трехмерную функцию близости. Был построен график плотности поглощенной энергии в резисте, которая в интересующем диапазоне критических размеров 10-22 нм имеет заметный градиент по радиусу от оси пучка, что в дальнейшем позволило оптимизировать разрешающую способность в системе резист-пучок. Автором провел анализ результатов по исследованию селективности анизотропного плазмохимического травления различных функциональных слоев материалов, применяемых в микроэлектронике, по отношению к резисту HSQ, на основании которых определены параметры плазмохимического травления, необходимые для создания прототипов приборов нанoeлектроники с критическими размерами до 10 нанометров и аспектными отношениями до 1:10.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

- Proceedings of the International Conference «Micro- and Nanoelectronics – 2018» (г. Звенигород, 2018);
- Международный Форум «Микроэлектроника 2019», Школа Молодых Ученых (респ. Крым, пгт. Гурзуф, 2019);
- XIII Международная конференция «Кремний 2020» (респ. Крым, пгт. Гурзуф, 2020);
- Международный Форум «Микроэлектроника 2021», Школа Молодых Ученых (респ. Крым, пгт. Гурзуф, 2021);
- 14-я Международная конференция «Микро- и нанoeлектроника - 2021 (ICMNE-2021) (г. Звенигород, 2021).

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ в журналах, входящих в перечень ВАК, из них 2 статьи в журнале, индексируемом в базе данных Scopus.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 114 наименований. Объем диссертации составляет 114 страниц, включая 55 рисунков, 30 формул и 1 таблицу.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научные и практические результаты, полученные при выполнении работы, представлены положения, выносимые на защиту, содержатся сведения об апробации, личном вкладе и публикациях автора, а также описана структура диссертационной работы.

В **первой главе** представлен анализ современного применения электронно-лучевой литографии, перечислены ее основные достоинства в качестве метода формирования нанометровых топологических элементов полупроводниковых структур, представлено описание принципа работы электронно-лучевого литографа. Приведено описание электронных резистов, их классификация, в том числе резистов с химическим усилением скрытого изображения. Рассмотрен механизм рассеяния электронов в резисте, процессы упругого и неупругого рассеяния, а также процесс потерь энергии, вызванного неупругим рассеянием.

Представлено описание чувствительности и контрастности резиста как основных параметров, влияющих на его разрешающую способность. Выполнен обзор существующих методов усиления контраста, таких как использование различных растворов проявителя, влияние фактора времени проявления и температуры пред- и постэкспозиционной сушки резиста.

Рассмотрено влияние эффекта близости при экспонировании электронным лучом – дополнительной засветки близкорасположенных областей – как одной



из основных проблем электронной литографии, влияющей на ее разрешение. Указаны различные пути коррекции данного эффекта с целью увеличения точности электронной литографии и сокращения времени экспонирования структур, такие как геометрическая коррекция или разбиение структур на области с различной дозой экспозиции для компенсации нежелательной засветки. Показано, что наилучшим решением для компенсации эффекта близости является компьютерное моделирование с целью подбора оптимальных параметров экспонирования. Представлен обзор современных методов коррекции эффекта близости, в частности подход с использованием нескольких гауссовых функций для представления функции распределения энергии электронного пучка в материале образца.

Представлен анализ параметра шероховатости края экспонируемой линии, влияющий на минимальный размер и максимальную плотность и качество структур, реализуемых с помощью электронно-лучевой литографии, рассмотрены факторы, влияющие на шероховатость. Приведены основные методики оценки шероховатости, включающие ее частотный анализ с использованием спектральной плотности мощности, являющейся дисперсией края на единицу частоты и рассчитывающейся как квадрат коэффициентов преобразования Фурье отклонения края, а также метод оценки с использованием атомно-силовой микроскопии. Рассмотрены методы минимизации шероховатости края линии, такие, как обработка экспонируемых структур в различной плазме, что является в настоящее время основным инструментом минимизации шероховатости края, а также метод изменения раствора проявителя.

Приведено описание используемого в данной работе негативного электронного резиста HSQ (hydrogen silsesquioxane), представляющего значительный интерес для сообщества нанолитографии и нанонауки как резист высокого разрешения, обладающего как высокой механической стабильностью, так и хорошей стойкостью к химически активной плазме.

Рассмотрен механизм плазмохимического травления как инструмента переноса топологии в различные функциональные слои материалов,

применяемых в нанoeлектронике (кремний, диэлектрики, металлы). Проведена оценка локальных эффектов, не позволяющих достигнуть высокой селективности процесса травления, таких как «подтрав». Указано, что в общем случае плазмостойкость исследуемого резиста, и, соответственно, селективность процесса плазмохимического травления не является постоянной, а зависит и от свойств резиста, и от химии плазмы, а также режимов плазмохимического травления структур.

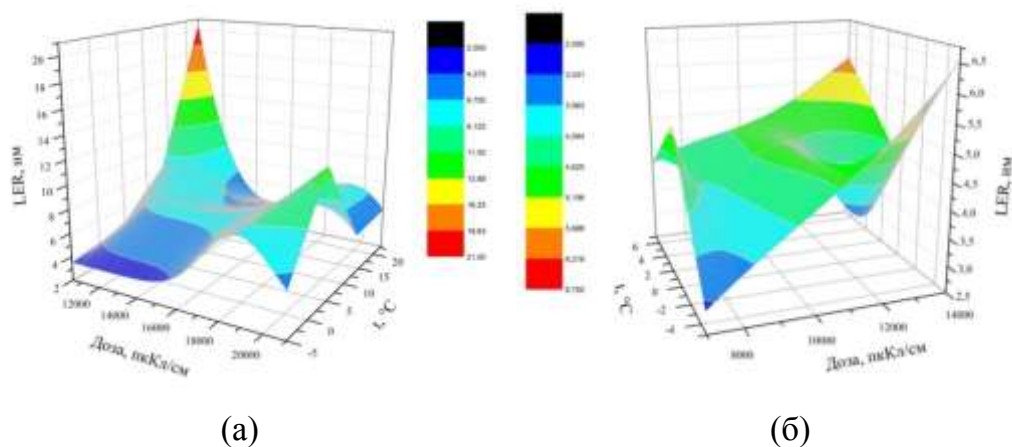
Во **второй главе** представлено описание методов исследования и оборудования, используемого при выполнении работы. Приведены основные параметры электронно-лучевого литографа Raith-150, сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Ultra55 (СЭМ), атомно-силового микроскопа ACM Nanopics 2100 (АСМ), установки Plasmalab Dual System 100 для плазмохимического травления структур, эллипсометра М-2000Х для измерения толщин нанесённых диэлектрических плёнок, а также оборудования для достижения повышенных и пониженных температур раствора проявителя. Представлено описание программного обеспечения для компьютерного моделирования влияния эффекта близости «ProхуFn», а также программного обеспечения для оценки шероховатости края линий «LER&LWR Calculator».

**Третья глава** посвящена исследованию влияния режимов проявления на параметры топологического рисунка HSQ резиста и разделена на две части. В первой части рассматривается влияние температуры проявления на шероховатость края экспонируемых линий в резисте HSQ. Экспонировались spl-линии (single pixel line) с разными дозой (от 5000 пКл/см до 20000 пКл/см) и плотностью упаковки (первоначальным расстоянием между spl-линиями): 200 нм, 100 нм, 80 нм, 60 нм, 50 нм, 40 нм. Максимальная энергия первичного пучка электронов 30 кэВ. В качестве подложек использовались кремниевые пластины кристаллической ориентации (100). Перед нанесением резиста пластина очищалась органическими растворителями, после чего её поверхность дегидратировалась в среде азота при температуре +250 °С в течение 60 минут. Негативный электронный резист HSQ XR-1541 с 2% концентрацией наносился на поверхность пластины на центрифуге SAWATEC при 3000 об/мин. Сушка

резиста производилась при температуре 150 °С в течении 6 минут также в среде азота.

После экспонирования образцы проявлялись в водном растворе 1% NaOH и 4% NaCl при разных температурах: 23°С, 7°С, 0°С, -5°С. Время проявления составляло 4 мин для 23°С и 10 мин для 7°С, 0°С и -5°С. Различное время проявления обусловлено тем, что при понижении температуры происходит снижение скорости химических реакций, происходящих в проявителе, что требует увеличения времени проявления. Далее образцы промывались в течение 60 с последовательно в деионизированной воде, изопропанолу, и сушились в потоке сухого азота.

После предварительного исследования полученных структур в сканирующем электронном микроскопе, производилась оценка шероховатости проэкспонированных линий с использованием программного обеспечения «LER&LWR Calculator». Для каждой из групп линий с различной плотностью упаковки были подсчитаны значения шероховатости края при фиксированных дозе облучения и температуре проявления. На основе полученных данных с использованием программного обеспечения «Origin» были построены 3D поверхности зависимости LER от дозы облучения и температуры проявления, представленные на рис. 1.



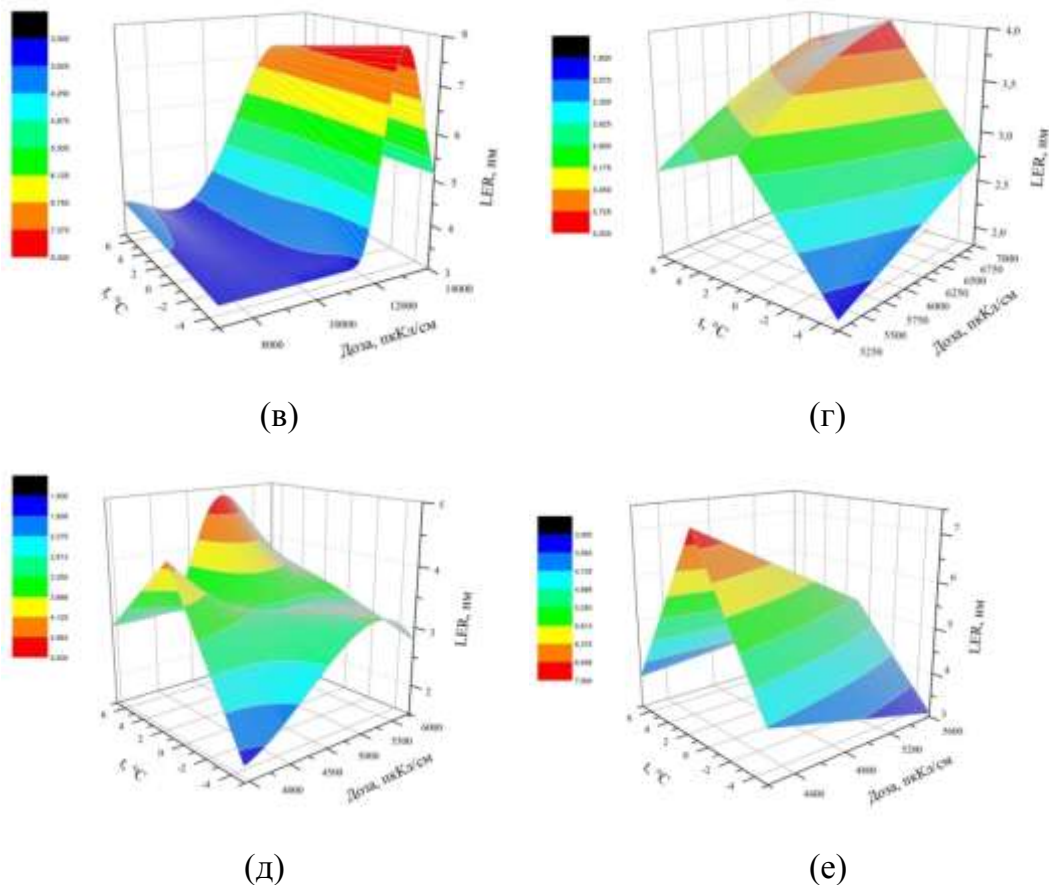


Рис. 1. Зависимость шероховатости края линии (LER) от доз экспонирования и температуры проявления при разной первоначальной плотности упаковки  $sr1$ -линий: 200 нм (а); 100 нм (б); 80 нм (в); 60 нм (г); 50 нм (д); 40 нм (е).

При понижении температуры проявителя уменьшается скорость протекания химических реакций, тем самым увеличивается вязкость проявителя. Ввиду этого факта при понижении температуры области, в которых наличествуют остатки резиста, не успевают полностью избавиться от молекул HSQ, тем самым оставаясь затянутыми резистом, что делает экспонированную линию более гладкой.

С понижением температуры проявления происходило уменьшение ширины экспонированных линий, что наблюдалось вне зависимости от плотности упаковки линий, что позволяет предположить слабое влияние эффекта близости в данном случае в первом приближении. Подсчитано, что наиболее низкое значение шероховатости края экспонируемой линии наблюдается при проявлении при  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Во второй части третьей главы исследовалось влияние температуры проявления на контраст резиста HSQ. Для исследования кривых контраста был подготовлен топологический шаблон, состоящий из набора квадратных площадок размерами 3x3 мкм с разными дозами. Для каждой отдельной площадки задавался свой множитель базовой дозы, который лежал в пределах от 0.5 до 4.18. Базовая доза экспонирования составляла 1000 мкКл/см<sup>2</sup>. Маршрут подготовки образцов совпадает с описанным в первой части. После экспонирования образцы проявлялись в водном растворе 1% NaOH и 4% NaCl при разных температурах в диапазоне +10 - +60 °С в течение 4 минут. Помимо этого, образцы проявлялись при пониженных температурах 0 °С и -5 °С при разных значениях времени проявления: 4 мин, 7 мин, 10 мин, 15 мин.

Анализ остаточной толщины резиста для каждой площадки проводился с использованием АСМ в полуконтактном режиме измерений с использованием кремниевых кантилеверов. На основании полученных в АСМ амплитудных изображений были построены кривые контраста резиста для различных значений температуры проявления.

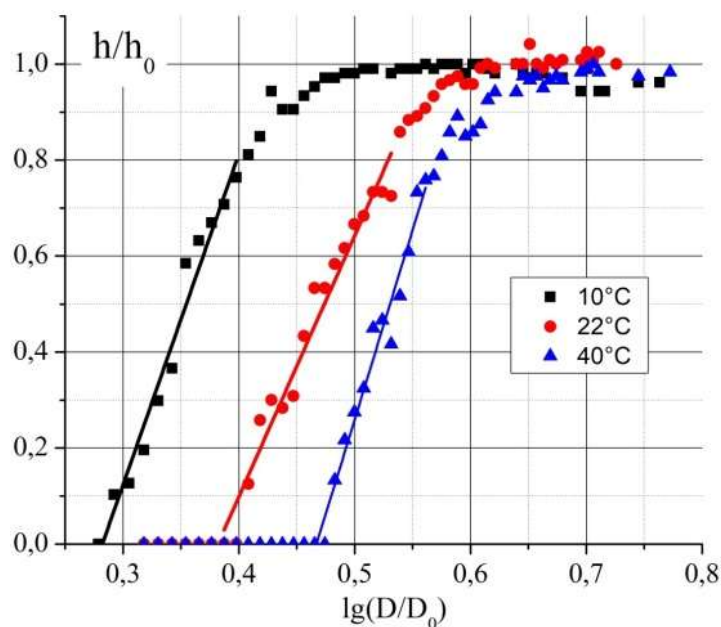


Рис. 2. Нормализованные кривые контраста резиста HSQ при разных температурах проявителя: +10 °С, +22 °С и +40 °С.  $h_0 = 120$  нм,  $D_0 = 500$  мкКл/см<sup>2</sup>.

Из данных рис. 2 следует, что при температуре проявителя +10 °С контрастность резиста для щелочно-солевого метода проявления составила  $\gamma = 6,9$ , для температуры проявления +22°С  $\gamma = 5,4$ , а для +40 °С  $\gamma = 7,9$ . По представленным зависимостям, контраст при температуре проявления +40 °С на 45% лучше, чем при проявлении при +22 °С. При понижении температуры проявления до +10 °С, резист продемонстрировал улучшение контраста на 27% по сравнению с +22 °С.

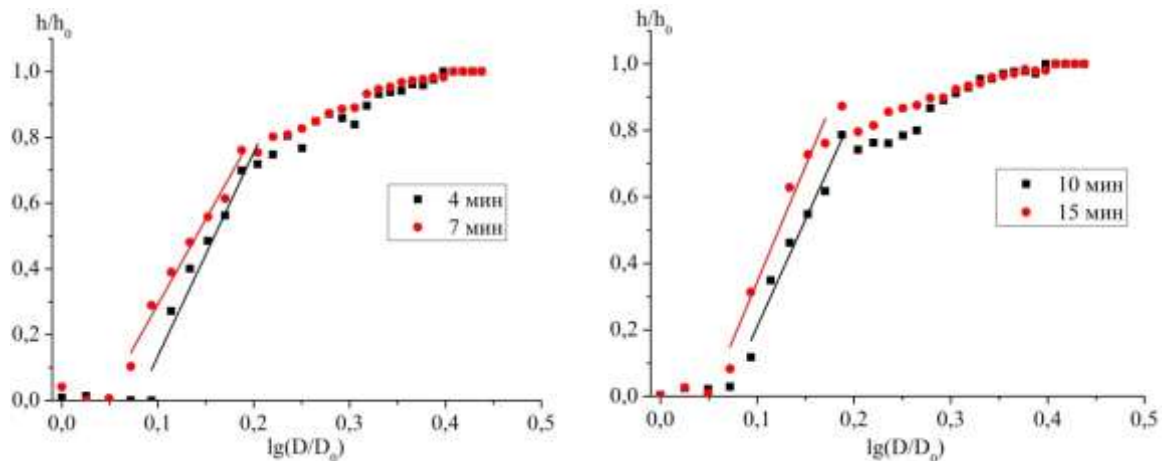


Рис. 3. Нормализованные кривые контраста резиста HSQ при щелочно-солевом проявлении при 0 °С и различном времени проявления: 4 мин, 7 мин, 10 мин, 15 мин.  $h_0 = 60$  нм,  $D_0 = 500$  мкКл/см<sup>2</sup>.

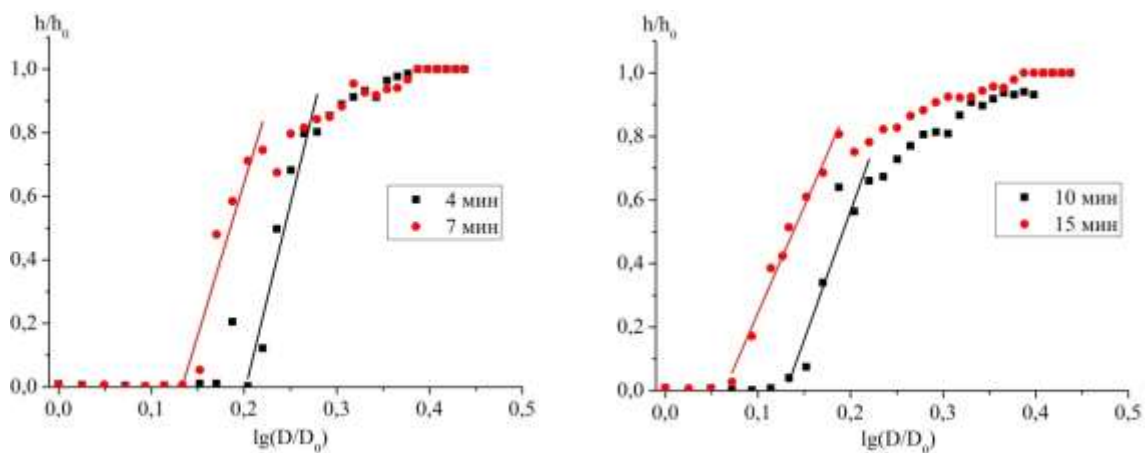


Рис. 4. Нормализованные кривые контраста резиста HSQ при щелочно-солевом проявлении при -5 °С и различном времени проявления: 4 мин, 7 мин, 10 мин, 15 мин.  $h_0 = 60$  нм,  $D_0 = 500$  мкКл/см<sup>2</sup>.

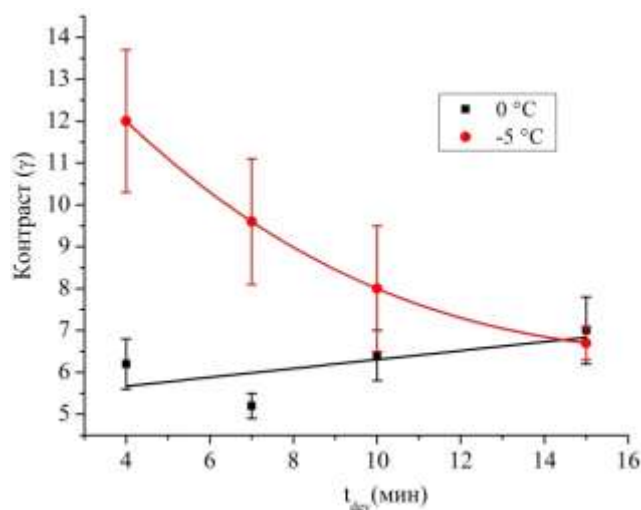


Рис. 5. Зависимость контраста резиста HSQ от времени проявления  $t_{dev}$  (мин) при фиксированной температуре проявителя: 0 °C и -5 °C.

Проявление при пониженных температурах 0 °C и -5 °C в растворе NaOH-NaCl продемонстрировало усиление контраста в сравнении с традиционной температурой проявления (рис. 3, 4). Наблюдалось увеличение контраста более чем на 100% при -5 °C ( $\gamma = 12$ ), тогда как при 22 °C  $\gamma = 5,4$ , время проявления составило 4 мин. Помимо этого резист демонстрировал более высокую чувствительность. Таким образом, было обнаружено немонокотное изменение параметра контраста резиста от температуры проявления.

На рис. 5 представлена зависимость контраста резиста HSQ при проявлении в растворе NaOH-NaCl для разных значений времени проявления и температуры. Можно заключить, что время проявления при температуре 0 °C практически не влияет на контраст резиста. Однако для -5 °C наблюдается уменьшение контраста при увеличении времени проявления. Данный факт может быть объясним тем, что 4 мин достаточно для полного проявления резиста ввиду небольшой толщины резистивной пленки (60 нм). В общем случае, скорость протекания химических реакций при проявлении существенно зависит от температуры проявителя. Для температуры проявления 0 °C скорости реакции достаточно для полного проявления структур уже при 4 мин. При понижении температуры до -5 °C ввиду неоднородного распределения поглощенной дозы остаются области с меньшей поглощенной дозой. При увеличении времени

проявления эти области будут растворяться, что приводит к снижению контраста.

Выявленные условия увеличения контраста резиста HSQ позволили получить увеличение плотности экспонированных структур линия/промежутки электронно-лучевой литографией. В частности, с использованием высококонтрастного метода проявления удалось сформировать плотную группу линий с критическим размером 10 нм и интервалами между соседними линиями 20 нм и 30 нм (рис. 6).

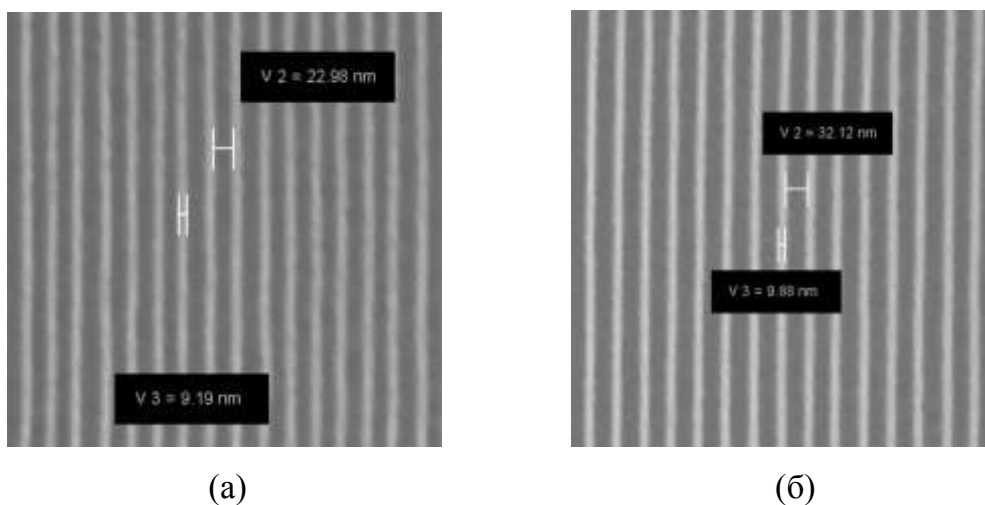


Рис. 6. Экспонированные линии шириной суб-10 нм с интервалами между соседними линиями  $\sim 20$  нм (а) и  $\sim 30$  нм (б), сформированные при температуре проявления  $+40$  °С.

На основе усовершенствования метода проявления электронного резиста HSQ была впервые обнаружена немонотонная зависимость контраста резиста от температуры проявления в щелочно-солевом растворе NaOH-NaCl, а также продемонстрировано усиление контраста при проявлении при пониженных температурах от  $-5$  °С до  $10$  °С. С использованием данного метода проявления могут быть изготовлены топологически плотные массивы элементов с суб-10 нм разрешением в резисте HSQ, что необходимо для прототипирования элементов интегральных схем.

В **четвертой** главе описано моделирование влияния эффекта близости при экспонировании с использованием программного обеспечения «ProxуFn».

Для расчета использовалась трехмерная функция близости:



$$G_r(r, z) = C_\delta(z)\theta(r) + \frac{C_a(z)}{1 + \left(\frac{r}{\alpha(z)}\right)^2} + C_b(z)\exp\left(-\left(\frac{r}{\beta(z)}\right)^2\right), \quad (1)$$

где  $\theta(r) = \begin{cases} 1, & r = 0 \\ 0, & r > 0 \end{cases}$ , а  $C_\delta(z)$ ,  $C_a(z)$ ,  $C_b(z)$ ,  $\alpha(z)$ ,  $\beta(z)$  – подгоночные параметры, зависящие от глубины резистной пленки. Были определены значения подгоночных параметров  $C_\delta(z)$ ,  $C_a(z)$ ,  $C_b(z)$ ,  $\alpha(z)$ ,  $\beta(z)$  при разной толщине слоя резиста и на их основе построен график  $G_r(r, z)$ .

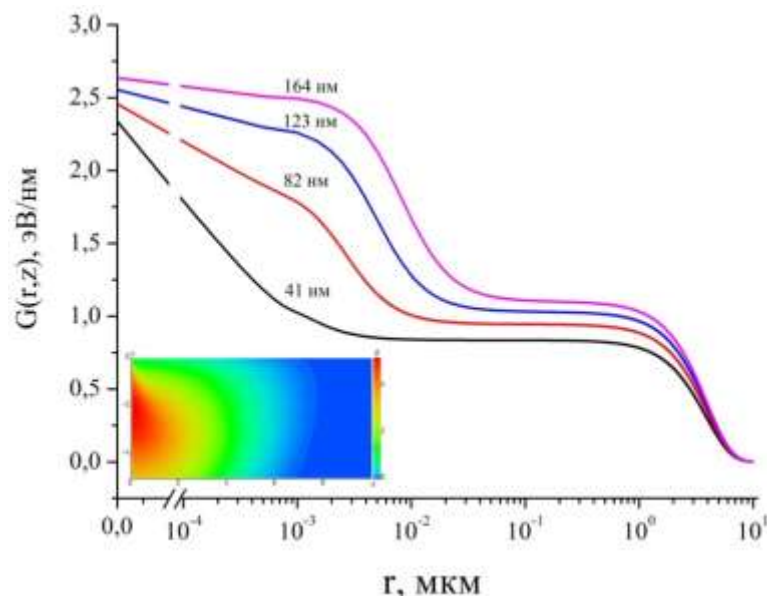


Рис. 7. Интегральная плотность поглощенной энергии, рассчитанная методом Монте-Карло для четырех сечений по  $z$ : 41 нм, 82 нм, 123 нм и 164 нм. Начальная энергия электронов – 30 кэВ. На врезке – 2D интерполяция данных для различных сечений.

Показано, что в интересующем диапазоне критических размеров 10-22 нм функция  $G(r, z)$  имеет значительную зависимость от расстояния от оси пучка, что позволяет оптимизировать разрешающую способность в системе резист-пучок. Это, в совокупности с увеличением контраста резиста HSQ при пониженных температурах, может приводить к наблюдаемому увеличению разрешающей способности резиста.

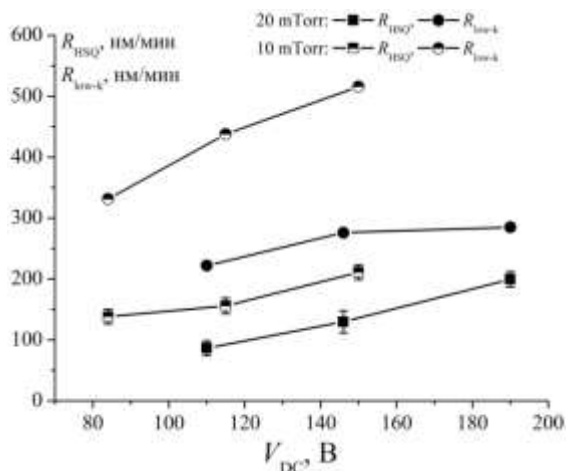
**Пятая** глава посвящена исследованию плазмостойкости резиста HSQ при анизотропном плазмохимическом травлении. В качестве образцов использовались пластины монокристаллического кремния КДБ-10 (100), а также структуры на их основе с нанесенными различными функциональными слоями:

оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) толщиной 100 нм, нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) – 130 нм, оксид гафния ( $\text{HfO}_2$ ) – 32,4 нм, оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – 110 нм, тантал (Ta) – 113,5 нм, пористый low-k диэлектрик на основе органосиликатного стекла (OSG) – 200 нм. Поверхности образцов перед нанесением слоя резиста предварительно очищались органическими растворителями с последующей дегидратацией в среде сухого азота при температуре 150 °С в течение 1 часа. Для исследований был использован HSQ резист XR-1541 Dow Corning 6% концентрации, который наносился на поверхность образца на центрифуге SAWATEC при 2000 об/мин, что позволяло получить толщину резиста до  $190 \pm 4$  нм. Сушка резиста проводилась при температуре 150 °С в течение 4 минут в среде азота. Экспонирование происходило при максимальной энергии первичного пучка 30 кэВ. Доза облучения варьировалась в диапазоне от  $500 \text{ мкКл/см}^2$  до  $2000 \text{ мкКл/см}^2$  с шагом  $125 \text{ мкКл/см}^2$ . После экспонирования образцы проявлялись в 25% водном растворе гидроксида тетраметиламмония (ТМАН) в течении 60 секунд, далее промывались в течение 60 секунд в деионизированной воде и сушились в потоке сухого азота. Перед процессом анизотропного плазмохимического травления образцы резистной маски подвергались термическому отжигу на воздухе в течение 30 минут при температуре 400 °С.

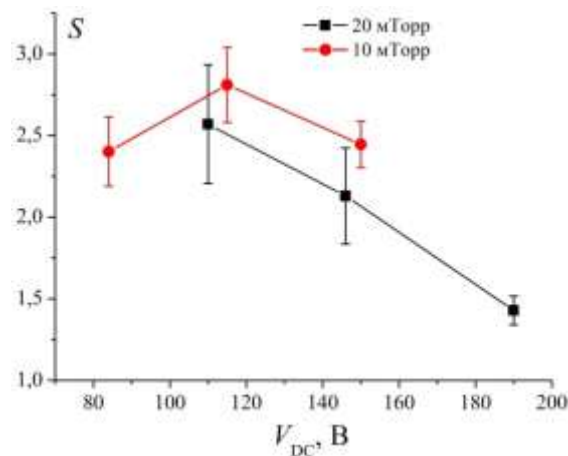
Анизотропное плазмохимическое травление структур проводилось в кластерной установке Dual PlasmaLab 100. В зависимости от химического состава вещества функционального слоя, подвергающегося травлению, выбирались индивидуальные параметры процесса травления (химический состав газовой смеси, мощность разряда, давление, напряжение смещения, температура подложки). Целью оптимизации анизотропного плазмохимического процесса травления было получение наибольшей селективности  $S$ , по отношению к маске, при сохранении степени анизотропии, обеспечивающей вертикальный профиль стенки структуры травления.

При травлении пористого low-k диэлектрика OSG с ростом напряжения смещения в исследованном диапазоне скорость травления и диэлектрика, и резиста возрастает (рис. 8 (а)), при этом при относительно низких давлениях в камере (10 мТорр) селективность значимо не зависит от напряжения смещения, а

при повышенных значениях давления (20 мТорр) селективность снижается с ростом напряжения смещения (рис. 8 (б)), что может быть объяснено ростом проникновения химически активных частиц плазмы в поры low-k диэлектрика с увеличением давления.



(а)



(б)

Рис. 8. Зависимость скорости травления (а) и селективности травления (б) по отношению к HSQ-маске пористого low-k диэлектрика от напряжения смещения  $V_{DC}$ .

Зависимость скоростей травления кремния и HSQ резиста от состава плазмы показана на рис. 9. С ростом относительного содержания  $SF_6$  в смеси  $SF_6/C_4F_8$  скорость травления кремния растет, а резиста – падает, что обеспечивает рост селективности до 20 и более.

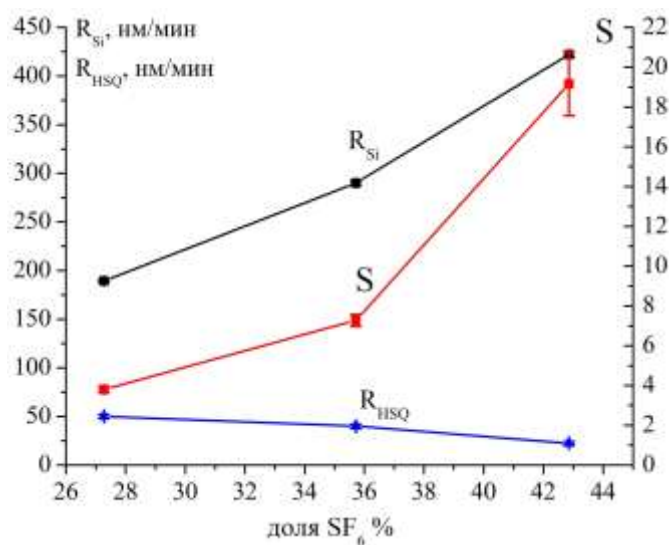


Рис. 9. Зависимость скоростей травления кремния и HSQ резиста от состава плазмы  $SF_6/C_4F_8$ .

Отмечается умеренное значение селективности  $S \sim 4$  при использовании смеси  $SF_6/C_4F_8=5/9$ , оптимальной для прецизионного формирования суб-20 нм структур, достаточно для формирования высокоаспектных структур типа Fin с высотой до 100 нм и более.

Для нитрида кремния и резистной маски с ростом давления происходит снижение скорости травления обоих материалов, что сильнее проявляется для нитрида кремния (рис. 10). В диапазоне давлений 30-50 мТорр селективность травления  $Si_3N_4/HSQ$  составляет  $S = 2-2,5$ . Это является близким к значениям, представленным в литературе данным по паре материалов  $Si_3N_4/SiO_2$ .

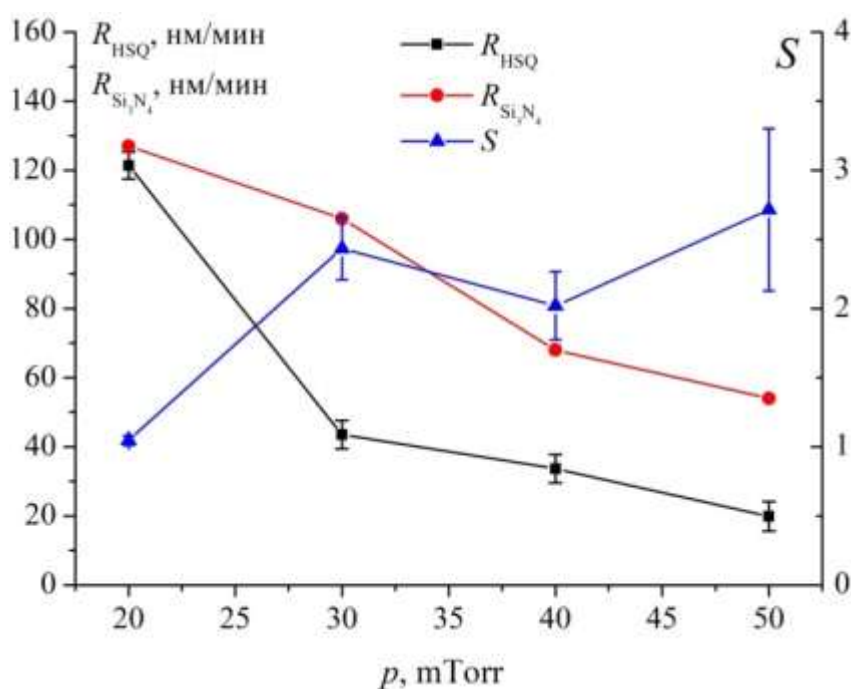


Рис. 10. Зависимость скорости травления резистной маски и нитрида кремния ( $Si_3N_4$ ) и селективности процесса травления от давления  $p$ .

При травлении структур металлического тантала с использованием плазмы  $C_4F_8/O_2$  оптимальная селективность на исследованном пространстве параметров достигалась при соотношении  $C_4F_8/O_2 = 40/10$  и  $V_{DC} = 110$  В. Полученное значение селективности  $S = 0,9$  хорошо коррелирует с известными ранее результатами травления тантала через маску HSQ во фторсодержащей плазме другого состава.

Для оксида алюминия добавка стимулирующих пассивацию поверхности газов ( $N_2$ ,  $O_2$ ) не привела к получению более высокой селективности.

Максимальная селективность  $S = 0,45$  для режима анизотропного травления была достигнута при использовании чистого  $\text{BCl}_3$  при  $V_{\text{DC}} = 160$  В.

Установлено, что добавка кислорода в плазму  $\text{BCl}_3$  не позволяет получить селективность более 0,5. Однако увеличение доли азота в смеси  $\text{BCl}_3/\text{N}_2$  приводит к росту селективности процесса к резисту HSQ, который можно объяснить более сильной пассивацией материала маски, чем поверхности оксида гафния (рис. 11). При увеличении доли азота в смеси до  $\sim 20\%$  травление оксида гафния прекращается (отрицательная скорость травления на графике объясняется тем, что при эллипсометрическом измерении детектируется осаждение полимерной пленки на поверхности оксида гафния). При доле азота в плазмообразующей смеси, равной 14%, оптимальная селективность  $S \sim 3$  к резисту HSQ.

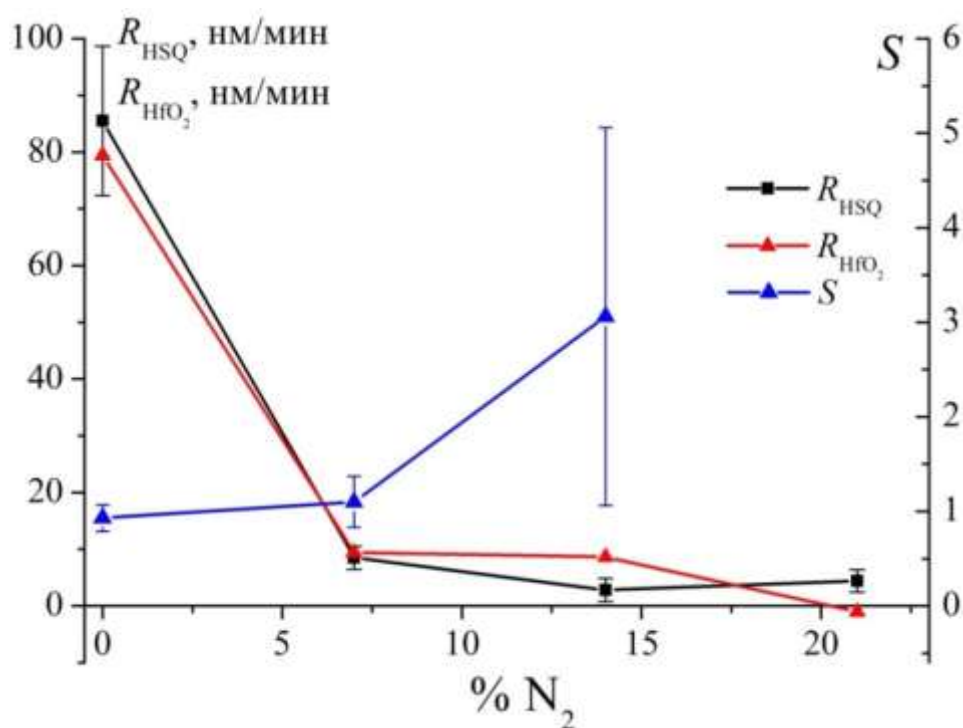


Рис. 11. Зависимость скорости травления резистивной маски и оксида гафния ( $\text{HfO}_2$ ) и селективности процесса при выбранных параметрах от доли азота  $\text{N}_2$  в составе плазмы  $\text{BCl}_3/\text{N}_2$ .

### Заключение. Основные результаты и выводы

1. Разработана методика повышения разрешающей способности и уменьшения шероховатости края экспонируемых линий при использовании HSQ

резиста.

2. Температура проявления электронного резиста HSQ является дополнительным фактором, позволяющим управлять контрастом резиста. Наблюдалось максимальное увеличение значения контраста при температуре проявления  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  на 122% относительно традиционной температуры проявления в растворе NaOH-NaCl. При этом впервые установлена немонотонная зависимость величины контраста от температуры проявления. Перспективным оказывается использование пониженных температур проявления.

3. Использование пониженных температур проявления в растворе NaOH-NaCl от  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  резиста HSQ способствует уменьшению критического размера экспонируемых структур при фиксированной дозе облучения в сравнении с традиционной температурой, а также способствует минимизации шероховатости края экспонированных линий.

4. Проведено моделирование влияния эффекта электронной близости, получены значения коэффициентов, входящих в трехмерную функцию близости, что в дальнейшем можно учитывать при экспонировании структур. Показано, что в интересующем диапазоне критических размеров 10-22 нм плотность поглощенной энергии электронов в резисте ( $G(r,z)$ ) имеет заметный градиент по радиусу от оси пучка, что позволяет оптимизировать разрешающую способность в системе резист-пучок.

5. Проведено исследование селективности анизотропного плазмохимического травления различных функциональных материалов, по отношению к негативному электронному резисту на основе водород-силсесквиоксана HSQ. Исследования формирования наноструктур были проведены на ряде материалов: монокристаллический кремний, слои металлического Ta и слои 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, нанесенных на кремниевые подложки. Показано, что резист HSQ может применяться для создания прототипов приборов наноэлектроники с критическими размерами до 10 нанометров, и аспектными отношениями до 1:10 при структурировании широкого спектра материалов.

### Публикации по теме диссертации

1. Красников Г.Я., Гуцин О.П., Шишлянников А.В., Горнев Е.С., Орликовский Н.А., Татаринцев А.А. «Исследование технологических параметров современных электронных резистов», Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, том 3, 2017, с. 33-52.
2. Татаринцев А.А., Шишлянников А.В., Руденко К.В., Рогожин А.Е., Иешкин А.Е. «Влияние температуры проявления на контраст электронного резиста HSQ», Микроэлектроника, том 49, №3, 2020, с. 163-169. DOI: 10.31857/S0544126920030060
3. Tatarintsev A.A., Shishlyannikov A.V., Rudenko K.V., Rogozhin A.E., Ieshkin A.E. «The effect of temperature on the development of a contrast HSQ electronic resist», Russian Microelectronics, V. 49, №3, 2020, P. 151-156. (Scopus) DOI: 10.1134/S1063739720030063
4. Мяконьких А.В., Шишлянников А.В., Татаринцев А.А., Кузьменко В.О., Руденко К.В., Горнев Е.С. «Исследование плазмостойкости электронного резиста HSQ высокого разрешения для прототипирования приборов нанoeлектроники», Микроэлектроника, том 49, №5, 2021. DOI: 10.31857/S0544126921050045
5. A. V. Miakonkikh, A. V. Shishlyannikov, A. A. Tatarintsev, V. O. Kuzmenko, K. V. Rudenko, E. S. Gornev. «Study of the Plasma Resistance of a High Resolution e-Beam Resist HSQ for Prototyping Nanoelectronic Devices», Russian Microelectronics, V. 50, №5, 2021, P. 297-302. (Scopus) DOI: 10.1134/S1063739721050048