

лизовать уровень освоения соответствующих курсов (предметов) в режиме автоматизированного самоконтроля;

-изучать средства, методы, системы автоматизации и телекоммуникационной поддержки научно-образовательной работы;

-учиться использованию разнообразных средств и программного обеспечения информационных технологий.

Ориентация НОЦ «Плазма» на решение фундаментальных проблем приложений физики низкотемпературной плазмы определяет широкое использование достижений теоретической физики, атомной спектроскопии (и в теоретическом, и в экспериментальном аспектах) лазерных методов исследования и обработки различных объектов, физики и техники электрического тока в газах, плазмохимии, астрофизики и многого другого, способствующего усвоению и творческому использованию знаний и навыков, которые помогает сформировать общение со средой

автоматизированных программно-аппаратных информационно-измерительных и управляющих комплексов в НОЦ «Плазма». Эта среда постоянно модернизируется, расширяется за счет включения новых электронных пособий, прикладных программ, справочного обеспечения и интерфейсов интерактивного общения пользователей с ресурсами обсуждаемой среды.

В настоящее время только тестирование при самоподготовке на комплексе провели (за год с небольшим) около 40000 человек. По мере расширения круга электронных пособий по прикладной программе число пользователей (обучаемых) неуклонно растет.

Литература

1. Жарков Ф.П., Каратаев В.В., Никифоров В.Ф., Панов В.С. Использование виртуальных инструментов LabView.-М: Радио и связь, 1999, 268 с.(см. также <http://www.labview.ru/>)

2. Открытые системы. М: Совет РАН по автоматизации научных исследований, 1995, 182 с.

Новые материалы и химические технологии

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ РЕЗИСТА НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО ОКСИДА ВАНАДИЯ

Величко А.А.1,2, Стефанович Г.Б1,2., Пергамент А.Л1.,

Стефанович Д.Г1,2, Кулдин Н.А.1

1Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск; 2 Applied Phase Transition, Inc., Los Angeles

1. Введение

При переходе к литографии с разрешением меньшим, чем 100 нм сухое проявление резиста становится практически безальтернативным технологическим приемом. Сухое проявление основано на травлении резиста в плазменных, ионно-лучевых или плазмохимических процессах. В настоящий момент основные усилия сосредоточены на разработке плазмохимических процессов проявления, т.к. они обладают большей селективностью, скоростью и анизотропией травления. Основная концепция плазмохимического травления проста и прозрачна [1]. Разряд генерирует химически активные частицы (атомы, радикалы или ионы), которые, вступая в химическую реакцию с обрабатываемым веществом, образуют легко летучие соединения, удаляемые вакуумной системой. Существуют не только научные, но и промышленные процессы и соответствующее оборудование для плазмохимического травления стандартных для микроэлектроники материалов – кремния, диоксида кремния, нитрида кремния, алюминия, вольфрама. Эти процессы широко используются для травления металлических и диэлектрических слоев при создании полупроводниковых структур. Сухое травление практически не применяется для проявления

резиста, что в первую очередь связано с низкой плазмо- и термостабильностью органических резистов.

В ряде работ нами показано, что аморфные слои оксидов ванадия, получаемые методом анодного окисления, можно применять в качестве неорганического резиста для литографии с разрешением меньшим чем 100 нм [2,3]. При этом ключевые параметры нового резиста (разрешение <100 нм, чувствительность ~15 мкКл/см² для электронно-лучевого экспонирования) не уступают органическим резистам, а после экспонирования материал обладает высокой плазмо- и термостабильностью, характерной для неорганических веществ и допускающей сухое плазменное проявление.

Анодные оксидные пленки ванадия, получаемые в нашем процессе, идентифицируются как диоксид ванадия. На внешней границе присутствует тонкий слой пятиоксида ванадия, границу с металлом определяют низшие оксидные фазы [4,5] – см. рис. 1.

В настоящей работе представлены результаты исследований поведения анодных оксидов в различных плазменных процессах, демонстрирующие возможность сухого проявления резиста на основе аморфных оксидов ванадия. Анодные оксиды были получены окислением напыленных на Si подложки тонких пленок ванадия толщиной 400 нм при напряжении анодирования 5 В и времени окисления 5 мин. В этом случае резист представлял собой двухслойную композицию с толщиной оксидной части 300 - 400 нм и металлическим слоем толщиной ~ 100 нм. Электронно-лучевое экспонирование производилось при помощи электронного микроскопа Hitachi 5300 оснащенного системой для генерации наноразмерных рисунков при напряжении экспонирования 25 кВ, токе 100 пА и набором доз от 10 до 1000 мкКл/см²

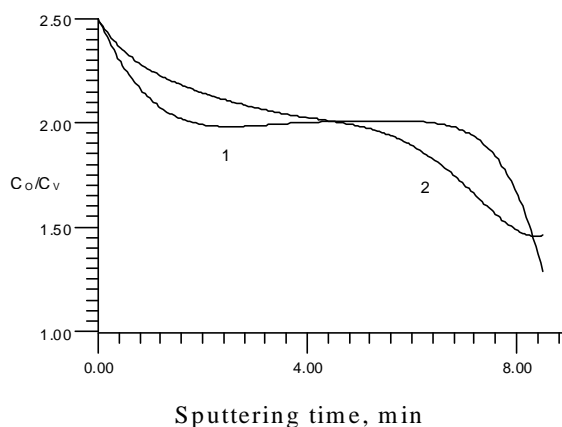


Рисунок 1. Зависимость отношения концентрации атомов кислорода к атомам ванадия от толщины оксида, полученного при различных условиях окисления (1,2). Данные получены по результатам Оже – спектроскопии.

2. Проявление оксидного резиста травлением в плазме Ag

В этом случае проявление осуществлялось бомбардировкой ионами аргона вызывающими селективное физическое травление оксида. Травление осуществлялось в установке Balzers SCD 040 на постоянном токе при давлении Ag 3-10 Тор, напряжении 200-300 В и токе 150 мА. Для увеличения плотности плазмы в зоне травления использовалась система постоянных магнитов создающих магнитное поле с вектором индукции параллельным подложке.

Было обнаружено, что скорость травления неэкспонированного резиста существенно выше, чем экспонированного. Нами было показано, что результатом электронно-лучевой обработки исходно аморфного резиста является стимулирование сложных окислительно-восстановительных реакций на внутренних и внешних границах оксида [2]. Параллельно возможно протекание кристаллизационных процессов. Таким образом, селективность травления обусловлена различием в химическом составе и структурном состоянии исходных и экспонированных резистов.

После травления оксидной части резиста происходит травление металла. Этот процесс характеризуется низкой селективностью и, как правило, приводит к снижению общей высоты ступеньки резиста. Однако, в том случае когда удастся сохранить достаточно толстый слой экспонированного оксида травление не защищенного оксидной маской металла идет с высокой скоростью и весь процесс достаточно селективен. Наблюдаемые эффекты подобны процессам, происходящим при влажном травлении анодного оксида [2].

На результат травления большое влияние оказывает начальный период обработки, когда убирается слой высшего оксида. Этот процесс также характеризуется низкой селективностью и скоростью травления. Если слой пентаоксида ванадия достаточно толстый то, в ходе его травления происходит кристаллизация всего оксида и различие между экспонированными и исходными участками исчезает. Подобно влажному травлению сухое проявление улучшается при проведении дополнительного послезащитного отжига в инертной или восстановительной атмосфере, который вероятно уменьшает толщину высшего оксида.

Количественные характеристики процесса физического травления резко зависели от условий осаждения металла, окисления и хранения образцов как до, так и после экспонирования. Ключевые параметры процесса физического травления можно суммировать следующим образом

- скорость травления неэкспонированного оксида: 3 нм/с;
- скорость травления экспонированного оксида 8 нм/с;
- скорость травления высшего оксида 1 нм/с;
- скорость травления низшего оксида 2 нм/с;
- скорость травления металла 15 нм/с;

Можно заключить, что физическое травление оксидно-ванадиевого резиста характеризуется в общем случае низкой селективностью и не может служить основной эффективной процессу проявления. Однако, оно может давать удовлетворительные результаты в том случае если процесс проявления идет в 2 этапа, когда на первой стадии проявляется оксидная часть резиста, а травление в плазме Ag используется для удаления металла незащищенного оксидом

3. Проявление оксидно-ванадиевого резиста плазменно-химическим травлением

Для увеличения селективности процесса проявления было использовано плазмохимическое травление. Травление проводилось в планарном реакторе с заземленным подложкодержателем с использованием ВЧ плазмы. ВЧ мощность варьировалась от 25 до 250 Вт. Использовались следующие газы и газовые композиции CF_4 , SF_6 , SF_6/CHF_3 , CF_4/O_2 , CF_4/H_2 , Cl. Давление газов варьировалось от 100 до 1000 мТор.

При травлении в CF_4 , CF_4/O_2 , CF_4/H_2 наблюдалось селективное травление оксидной части резиста, тогда как металлическая часть практически не травилась. Плазма SF_6 , SF_6/CHF_3 травил оксид приблизительно с той же скоростью и селективностью. Однако, после травления оксидной части резиста происходило эффективное травление ванадия. Отметим, что эта плазма широко применяется для травления кремния, причем скорость травления кремния выше, чем скорость травления ванадия. В этом случае, после завершения травления резиста, происходило быстрое и глубокое травление незащищенного кремния. Этот процесс требовал очень высокой однородности мно-

гослойного оксидно-ванадиевого резиста. В противном случае любая неоднородность травления приводит к созданию рельефа на поверхности Si.

Травление в плазме Cl показало, что в этом случае металл травится с высокой скоростью, тогда как оксид практически не удаляется при такой обработке. Травление оксида с высокой селективностью и удовлетворительной скоростью удалось реализовать при высокой температуре процесса (150-300°C). При этом после удаления оксида наблюдалось быстрое травление V, тогда как кремний в плазме Cl не травился. Этот процесс позволил проявить линии резиста толщиной < 100 нм с экспозиционными дозами ~ 20 – 50 мКл/см².

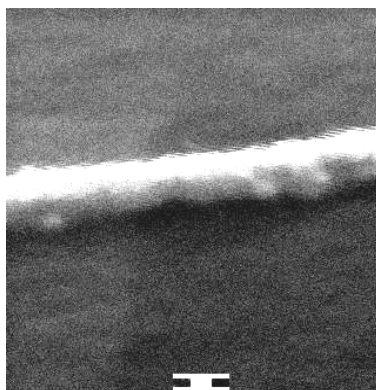


Рисунок 2. Линия оксидно-ванадиевого резиста на Si. Доза 175 мКл/см² (черно-белый маркер 100 нм).

Принципиально важным является то, что скорости травления всех частей оксидно-ванадиевого резиста были существенно ниже, чем для Si или SiO₂, что позволяет проводить сухое травление полупроводниковых подложек через резистивную маску.

4. Заключение

Полученные результаты показывают, что плазмохимическое травление может успешно использоваться для сухого проявления оксидно-ванадиевого резиста. Получены линии резиста с разрешением меньше 100 нм, экспозиционными дозами ~ 20 мКл/см² и высотой рисунка 100 – 200 нм, что вполне достаточно для эффективного сухого травления Si или SiO₂.

Основное препятствие на пути разработки эффективного процесса заключается в том, что сульфиды, хлориды, гидраты и фториды ванадия, образующиеся при обработке в плазме традиционных для микроэлектроники газов, имеют высокие температуры плавления и кипения. Это может потребовать высоких (до 300°C) температур процесса. Этого можно избежать, проводя одновременно физическое и химическое травление в смеси газов (например, Cl и (или) CF₄ с Ar).

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства Образования РФ и Американского Фонда Гражданских Исследований и Развития (CRDF) № PZ-013-02.

Литература

1. M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.

Заметим, что наличие толстого слоя высшего оксида негативно сказывалось на процессе проявления. Параметры процесса (скорость травления и селективность) улучшались, если этот слой предварительно удалялся влажным химическим травлением. Кроме того, положительное влияние оказывал послеэкспозиционный отжиг в инертной или восстановительной атмосфере.

Также как и в случае физического травления результат сильно зависел от условий осаждения металла, окисления и хранения образцов как до, так и после экспонирования.

Электронно-микроскопический рисунок линии резиста приведен на рис. 2.

2. F. A. Chudnovskii, A. L. Pergament, D. A. Schaefer, G. B. Stefanovich, *Proc. SPIE*, v. 2777, p.80 (1996).

3. A. L. Pergament, G. B. Stefanovich, E. L. Kazakova D.G. Stefanovich, A.A. Velichko, *Solid State Phenom.*, v. 90-91, p. 97-103 (2003).

4. F. A. Chudnovskii, G. B. Stefanovich. *J. Solid State Chem.*, v.98, p.137 (1992).

5. A. L. Pergament, G. B. Stefanovich, *Thin Solid Films*, v.322, n.1-2, p.33 (1998).

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛОКАЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Екимов К.А., Луизова Л.А., Соловьев А.В., А.Д.
Хахаев А.Д.

*Петрозаводский Государственный Университет,
Петрозаводск*

Определение локальных значений параметров плазмы: концентрации электронов, атомов в основном и возбужденных состояниях, атомной и электронной температуры в некоторых случаях возможно, если определены интенсивности и формы контуров спектральных линий, излучаемых различными элементарными объемами плазмы [1], что и является задачей локальной спектроскопии.

В решении этой задачи можно выделить следующие основные этапы:

- сбор массивов экспериментальных данных, связанных с пространственным распределением спек-