

Мяконьких Андрей Валерьевич

**МОНИТОРИНГ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР
МЕТОДАМИ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Специальность:

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2009 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской Академии Наук
Физико-технологическом институте РАН (ФТИАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Константин Васильевич Руденко

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Валерий Михайлович Шибков

доктор химических наук, профессор
Александр Михайлович Ефремов

Ведущая организация: ОАО “Научно-исследовательский институт точного машиностроения” (ОАО НИИТМ), г. Зеленоград

Защита состоится «17» декабря 2009 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 002.204.01 в Физико-технологическом институте Российской Академии Наук по адресу 117218, Москва, Нахимовский проспект, д.36, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИАН.

Автореферат разослан «16» ноября 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.204.01

кандидат физико-математических наук, доцент



В.В. Вьюрков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современные тенденции КМОП-технологии УБИС [1] — уменьшение проектных норм нанoeлектроники в область суб-100 нм, вариация толщины функциональных слоев в диапазоне 2 нм – 1 мкм, колоссальное расширение спектра применяемых материалов, рост числа технологических операций при изготовлении ИС, — резко увеличивают требования к точности плазменных технологий формирования микро- и наноструктур [2]. Сложность, многоканальный характер физико-химических явлений в системе низкотемпературная химически активная плазма – поверхность не позволяют в настоящее время создать всеобъемлющие теоретические модели плазменных реакторов и плазмохимических технологических процессов. Поэтому особую роль приобретают экспериментальные методы диагностики и мониторинга плазменных микроэлектронных технологий. Они широко используются при разработке плазмохимического оборудования, технологических процессов (process design), а также для невозмущающего контроля процессов *in situ*, в частности, детектирования момента окончания плазмохимического травления слоев, контроля стабильности технологий и др.

Информация о формировании микроструктур *in situ* может быть получена как диагностикой плазмы, находящейся в контакте с этими микроструктурами, так и прямой диагностикой поверхности пластины. Развитие последней группы методов осложняется нанометровыми размерами структур современных УБИС и невозможностью применения анализа поверхности электронными и ионными пучками в ионизированной среде технологической камеры.

Поэтому большое семейство современных методов диагностики технологических процессов [2] построено на спектральной диагностике плазмы *in situ*, в частности, на ее оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС), позволяющей анализировать поведение незаряженных частиц (активных радикалов) в ходе процесса. При этом оптическая эмиссия ионной компоненты плазмы, как правило, обладает значительно меньшей интенсивностью из-за

более высоких пороговых энергий возбуждения ионов и сравнительно небольшой электронной температуры применяемой плазмы.

В то же время, известный метод диагностики заряженных частиц плазмы - метод электростатических зондов Ленгмюра [3] применяется, в основном, для характеристики новых типов разрабатываемых реакторов, и практически не используется для мониторинга плазменных микротехнологий. Хотя определяемые Ленгмюровским зондом параметры (концентрация электронов n_e , положительных ионов n_{i+} , электронная температура T_e , потенциал плазмы V_p , плавающий потенциал V_f) потенциально чувствительны к физико-химическим процессам, протекающим на поверхности обрабатываемых микроструктур. Плазма и ограничивающие ее поверхности (стенки реактора, пластина с формируемыми структурами) представляют собой самосогласованную систему.

Известны [4] попытки зондового мониторинга плазмохимического травления (ПХТ) в диодном реакторе. Однако в емкостных диодных реакторах (1995 г.), при давлении ~ 500 мТорр, метод не удовлетворял требованиям невозмущающей диагностики. Кроме того, его применение сильно осложнялось специфическими пленкообразующими свойствами технологической плазмы.

Современные реакторы плотной плазмы низкого давления, с удаленной зоной плазмообразования во многом снимают эти ограничения и открывают перспективы для различных аспектов применения зонда Ленгмюра в диагностике плазменных технологий.

Цель диссертационной работы

Поэтому исследования, проведенные в настоящей работе, были сфокусированы на развитие методов зондовых измерений в пленкообразующей плазме технологических реакторов микроэлектроники, исследование свойств такой плазмы в условиях плазмохимического травления микроэлектронных структур, и разработке методов зондового мониторинга *in situ* процессов ПХТ.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- Разработать зондовый метод исследования пленкообразующей химически активной плазмы низкого давления для электроотрицательных газов.

° Исследовать изменения параметров плазмы в ходе анизотропного травления многослойных микроэлектронных структур и на этой основе обосновать методы определения момента окончания травления.

° На основе зондовой диагностики плазмы разработать методы контролирования состояния камеры для предотвращения дрейфа параметров процессов ПХТ при последовательной обработке пластин.

Научная новизна и достоверность диссертационной работы

Научная новизна работы состоит в следующих результатах, которые были получены впервые:

° Предложен и обоснован метод зондовых измерений в пленкообразующей плазме (метод динамического ленгмюровского зонда), применимый в условиях технологических реакторов микроэлектроники. Впервые проведены всесторонние зондовые измерения параметров плазмы низкого давления в ряде пленкообразующих газов (CHF_3 , CF_4 , C_4F_8 , C_3F_8 , SF_6/O_2). Анализ ФРЭЭ показал необходимость проведения характеристики реакторов микроэлектроники в плазме, непосредственно использующейся в технологическом процессе.

° Впервые исследованы изменения параметров плазмы при анизотропном травлении слоистых структур и предложены методы определения момента окончания травления на основе зондовой диагностики *in situ*. Зондовая диагностика момента окончания травления экспериментально подтверждена на структурах вида poly-Si/SiO₂/Si, SiO₂/Si и Si₃N₄/SiO₂/Si.

° Исследовано влияние потока продуктов реакций ПХТ со стенок реактора на параметры плазмы контрольного инертного газа. Показано, что этот эффект может использоваться для мониторинга состояния камеры между последовательными процессами ПХТ.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением фундаментальных физических теорий, использованием современных методов исследования, верификацией экспериментальных результатов независимыми методиками.

Положения, выносимые на защиту

- Метод динамического ленгмюровского зонда (ДЛЗ) для измерения параметров плазмы полимерообразующих газов в технологических реакторах микроэлектроники. Для интерпретации ВАХ можно использовать известный аппарат существующих зондовых теорий, так как измерение тока на зонд производится после установления квазистационарного слоя объемного заряда.
- Зондовый метод мониторинга параметров плазмы в ходе ПХТ микроэлектронных структур может быть использован для точного определения момента окончания травления функционального слоя. Это продемонстрировано для границ poly-Si/SiO₂, Si₃N₄/SiO₂, SiO₂/Si.
- Зондовой диагностикой *in situ* в плазме смеси SF₆/O₂/Ar установлено, что продукты реакций при травлении кремнийсодержащих структур вызывают изменения в электронной и ионной плотности и ФРЭЭ плазмы. Значения T_e и вид ФРЭЭ для плазмы рабочей смеси газов в присутствии обрабатываемой пластины значительно отличаются от плазмы Ar, полученной в тех же условиях разряда, что обуславливает необходимость проведения диагностики технологических реакторов в рабочих газовых смесях.

Практическая значимость работы

Разработанные зондовые методы могут быть применены для сертификации плазмохимических реакторов низкого давления, применяемых в микроэлектронике.

В ходе работы над диссертацией автором был разработан измерительный комплекс и программное обеспечение, реализующие возможности метода зондовых измерений методом ДЛЗ. Создан исследовательский вариант автоматизированного объединенного комплекса зондовой и спектральной диагностики плазменных технологий микроэлектроники.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на научных конференциях МФТИ (всероссийские) 2005, 2006, 2007, на международных конференциях «International Conference on Micro- and Nanoelectronics», Zvenigorod, Russia, 2005, 2007, 2009, на международном симпозиуме «Plasma Etch and Strip

Microelectronics», Leuven, Belgium, 2007, на заседании Школы молодых ученых «Нанопизика и наноэлектроника - 2008», Н. Новгород, 2008.

Публикации

Содержание диссертации опубликовано в 10 работах, в отечественных и зарубежных научных журналах, трудах и тезисах международных конференций, в том числе 2 статьи в журналах из перечня журналов и изданий, утвержденного Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации. Список публикаций автора приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Постановка задач исследования осуществлялась научным руководителем работы К.В. Руденко. Все эксперименты, представленные в диссертационной работе, обработка и интерпретация результатов были выполнены лично автором. Непосредственное участие коллег автора диссертации в проведенных исследованиях отражено в виде их соавторства в опубликованных работах. Результаты, выносимые на защиту и составляющие научную новизну работы, получены автором лично.

Структура работы

Диссертация состоит из предисловия, 4 глав, заключения и 3 приложений. Каждая из глав завершается разделом «Выводы», в котором кратко излагаются полученные в ней результаты. Общие выводы по работе приведены в Заключении.

Содержание диссертации изложено на 125 страницах. Рукопись содержит 48 рисунков, 7 таблиц. Список литературы содержит 105 ссылок на цитируемые источники в литературе. Кроме того, приведен список из 10 публикаций автора по теме диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 диссертации описывает современные применения плазменных технологий формирования субмикронных и наноразмерных структур в кремниевых ИС, требования, предъявляемые к плазменным реакторам, и диагностические средства, предназначенные для характеристики плазмохимического оборудования и мониторинга технологических процессов. Представлен обзор распространенных методов определения момента окончания процесса травления микроэлектронных структур. Приведены характеристики плазмохимического оборудования, на котором выполнялись эксперименты в диссертационном исследовании.

Изложена классическая теория метода одиночного зонда Ленгмюра, детально рассмотрены современные теории зондового тока, служащие для анализа зондовых вольтамперных характеристик (ВАХ). Проанализированы критерии выбора материала и геометрических размеров зонда. Выполнен анализ существующих подходов к зондовым измерениям в пленкообразующей плазме, их область применения и диагностические возможности.

Глава 2 посвящена предложенному методу динамического ленгмюровского зонда (ДЛЗ). Метод позволяет проводить зондовые измерения в плазме низкого давления, характеризующейся осаждением низкопроводящих пленок (полимерных и оксидных).

Идея метода основана на известном эффекте распыления поверхности ускоренными ионами, что позволяет выполнять очистку зонда в плазме, подав на него значительный отрицательный потенциал. Такая чистка позволяет удалять загрязнения, в том числе и термически стойкие. В работе показано, что в условиях, характерных для технологической плазмы низкого давления, загрязнение зонда происходит медленнее, чем установление стационарного зондового слоя объемного заряда, и следовательно существует временное окно для измерений невозмущенной ВАХ.

В главе проведен сравнительный анализ измеренных методом ДЛЗ характеристик плазмы газов CHF_3 , C_4F_8 , C_3F_8 , CF_4 в диапазоне давлений 1-20 мТорр.

Контрольные эксперименты для сравнения результатов выполнялись в плазме аргона при тех же внешних параметрах разряда. Использовались цилиндрические зонды Ленгмюра, изготовленные из вольфрама и платины. Для предварительной чистки поверхности зонда используется бомбардировка зонда положительными ионами из плазмы, при подаче на зонд значительного отрицательного потенциала (-160 ÷ -80 В), в области ВАХ соответствующей насыщению ионного тока.

В плотной ICP-плазме газа CHF_3 ($P=6$ мТорр, $W_{RF}=600$ Вт), обладающей сильной пленкообразующей способностью были выполнены измерения зондового тока при скачке потенциала зонда от -80 В до +10 В. Из Рис. 1 видно, что в пленкообразующей плазме наблюдается резкое падение зондового электронного тока примерно через 20 мкс после переключения потенциала в электронную ветвь. С другой стороны, расчеты времени установления стационарного зондового слоя составляет величину порядка 0,2 мкс при $n_e \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, при выбранных условиях эксперимента существует временное окно $0,2 \text{ мкс} < t_{meas} < 20 \text{ мкс}$, в котором зондовые измерения могут выполняться с проводящей поверхностью зонда.

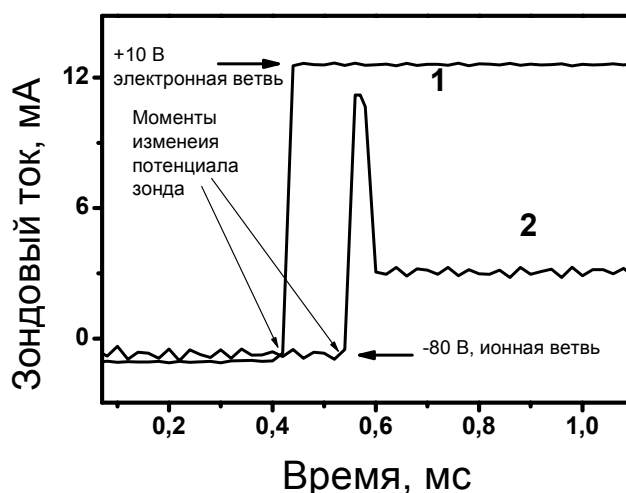


Рис. 1. Динамика изменения зондового тока при скачке потенциала зонда от -80 В до +10 В. 1 - Ag, 2 - CHF_3 (вольфрамовый зонд), временное разрешение – 5 мкс

Кроме того, при помощи запоминающего осциллографа выполнялись более детальные измерения кинетики осаждения пленок по наблюдениям деградации электронного тока после переключения потенциала зонда из значения

соответствующего насыщению ионного тока (чистка) в электронную ветвь (Рис. 2). Показано, что для плазмы исследованных фторуглеродных газов скорость образования диэлектрической пленки на платиновом зонде в 10^2 - 10^3 раз ниже, чем для вольфрамового зонда. Проведено сравнение скорости образования пленок для различных газов. Показанный на рис. 2б всплеск тока обусловлен всплеском при установлении напряжения на зонде и экспоненциальной зависимостью зондового тока от напряжения.

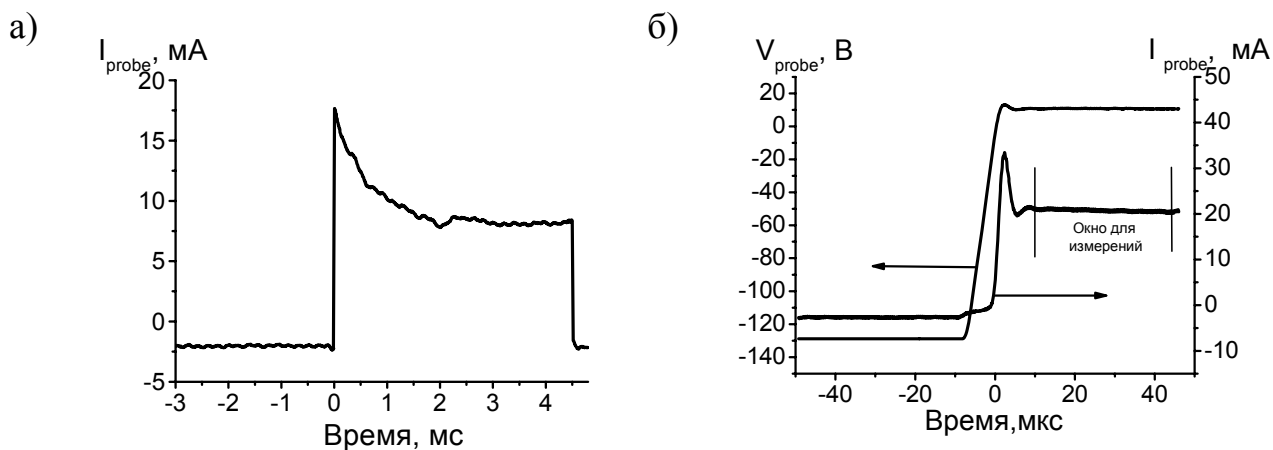


Рис. 2. Дegrадация электронного тока при импульсном переключении из режима чистки в плазме CHF_3 (платиновый зонд): а) временное разрешение - 5 мкс, б) временное разрешение - 50 нс.

Установлено, что ширина окна для t_{meas} зависит от вида газа и параметров разряда и не позволяет выполнить измерение всей ВАХ. Это предполагает измерения по циклограмме, показанной на Рис. 3. В зависимости от скорости пленкообразования определяется количество точек ВАХ, которые можно измерить между чистками. В случае слабой активности плазмы возможно выполнение чистки только перед измерением ВАХ.

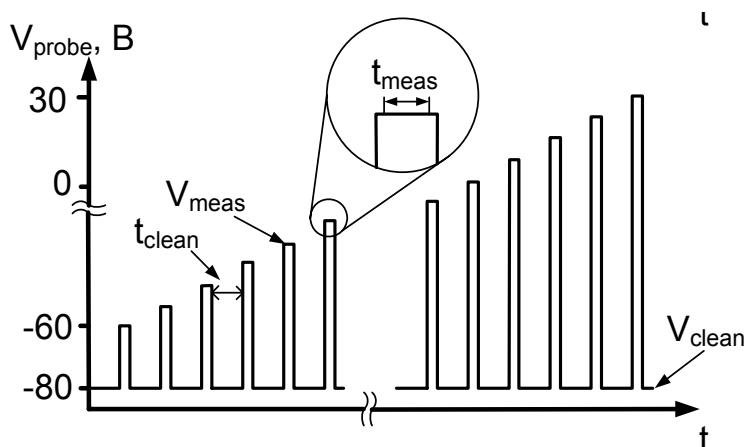


Рис. 3. Циклограмма измерения ВАХ методом динамического ленгмюровского зонда

В отличие от классического метода измерения ВАХ, при котором на зонде создается развертка потенциала с измерением тока, в методе ДЛЗ периоды измерения чередуются с периодами чистки зонда (длительностью t_{clean}) ионной бомбардировкой при потенциале V_{clean} .

Установлено, что если время чистки превышает t_{crit} , определяемое составом и давлением плазмы, то ВАХ зонда не зависит от длительности чистки, что служит критерием чистоты зонда от непроводящих пленок. Недостаточность времени t_{clean} приводит к значительному искажению вида ВАХ (Рис. 4).

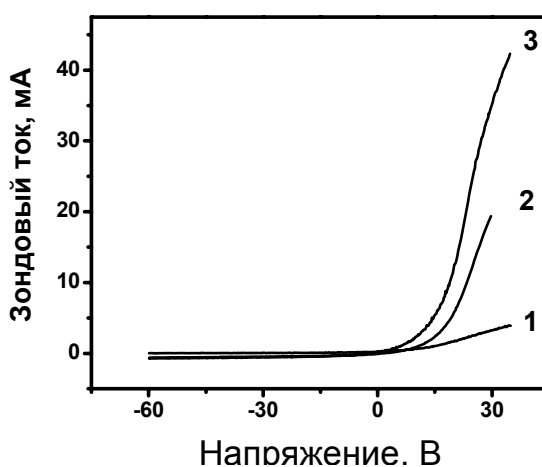


Рис. 4. ВАХ зонда, полученные в различных режимах чистки: 1 - без чистки зонда, 2 – $t_{clean} = 10$ мс, 3 - $t_{clean} > t_{crit} = 20$ мс

Свободная от диэлектрических пленок поверхность зонда позволила вести обработку экспериментальных ВАХ по известным теориям классической зондовой диагностики [5]. В таблице 1 приведены параметры плазмы аргона и технологических газов (без примесей) при одинаковых внешних параметрах разряда ($p = 2$ мТорр, $W_{RF} = 600$ Вт).

Таблица 1. Параметры плазмы полимеробразующих газов и аргона

| Газ | n_{i+2} , см ⁻³ | n_e , см ⁻³ | T_e , эВ |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------|
| Ar | $2,7 \cdot 10^{11}$ | $2,5 \cdot 10^{11}$ | 3,1 |
| CHF ₃ | $2,4 \cdot 10^{11}$ | $1,0 \cdot 10^{11}$ | 4,7 |
| CF ₄ | $9,5 \cdot 10^{10}$ | $7,2 \cdot 10^{10}$ | 4,5 |
| C ₃ F ₈ | $2,7 \cdot 10^{11}$ | $7,4 \cdot 10^{10}$ | 3,8 |
| C ₄ F ₈ | $1,4 \cdot 10^{11}$ | $8,1 \cdot 10^{10}$ | 4,3 |

Измерения в плазме газа CHF_3 без примесей аргона и кислорода проведены в настоящей работе впервые. Полученные значения электронной плотности плазмы находятся в хорошем соответствии с данными, представленными в исследованиях других авторов [6] для плазмы газовых смесей CHF_3/Ar и $\text{CHF}_3/\text{Ar}/\text{O}_2$. Теоретический анализ показал, что загрязнение зонда и шумы при измерении ВАХ уменьшают наклон ее электронной ветви, приводя к завышенным оценкам электронной температуры. Значение электронной температуры, полученное методом ДЛЗ, оказалось на 20% ниже, чем в [6], что подтверждает преимущества методики ДЛЗ при применении в пленкообразующей плазме.

После выполнения эксперимента поверхность зонда была исследована методом ВИМС. Установлено, что его поверхностный слой толщиной $\sim 1-1,5$ мкм модифицировался за счет обогащения углеродом и фтором, содержащимися в плазме в виде ионов (углерод, фтор). При использовании вольфрамового зонда такая модификация может снизить работу выхода электронов из материала зонда от 4,54 до 1,3-1,4 эВ. Моделирование теплового режима зонда, выполненное в работе, показало, что стационарные измерения в области электронной ветви ВАХ в плотной плазме (плотность тока электронов до $1,5 \text{ А/см}^2$) приводят к разогреву зонда до температуры порядка 1200 К. Совместное влияние этих факторов приводит к возникновению паразитной термоэлектронной эмиссии, искажающей измеряемые значения параметров плазмы. Таким образом, стационарные зондовые измерения невозможны. Необходимо применение метода ДЛЗ, при котором длительность работы зонда в режиме электронного тока не превышает 1 % от времени измерительного цикла, а температура зонда поддерживается на уровне, не допускающем термоэлектронную эмиссию.

В **Главе 3** работы исследуются возможности зондовой диагностики для контроля процессов ПХТ:

- Контроль стабильности условий в камере в ходе травления;
- Детектирование момента окончания травления структур;

° Мониторинг состояния камеры реактора в ходе серий процессов травления.

Приведенные в настоящей главе эксперименты сочетают в себе зондовый *in situ* мониторинг травления, выполняемый методом динамического ленгмюровского зонда, и ОЭС, верифицирующий метод.

В ходе исследований было показано, что в современных плазмохимических установках травления, применяемых в микроэлектронике, в реакторах с удаленным источником плазмы, зонд может быть размещен в периферийной области реактора, что исключает его влияние на технологический процесс.

Для проверки гипотезы о возможности зондового мониторинга стабильности условий в камере, использовалось импульсное изменение газового потока в камеру ($t_u = 0,1$ с, $T = 75$ с), вызывающее резкие периодические скачки давления. На Рис. 5 показан результат зондовых и оптических измерений, выполненных в плазме газа CF_4 ($p = 3$ мТорр, $W_{RF} = 800$ Вт). Установлено, что зондовый ток реагирует на скачок давления одновременно с сигналом ОЭС, как по нарастающему, так и по спадающему фронту, при большем отношении сигнал-шум, т.е. с большей чувствительностью в реальном времени. Это послужило отправным пунктом для исследования возможностей ДЛЗ как детектора момента окончания травления.

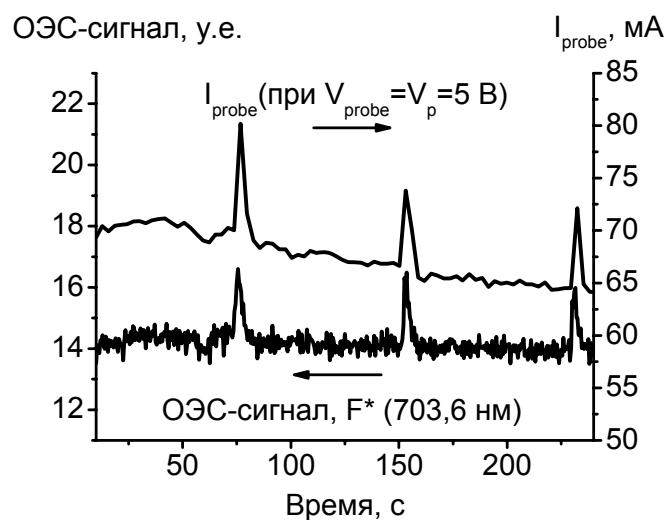


Рис. 5. Зондовый ток (при $V=5$ В) и спектральная интенсивность линии F^* (703,6 нм) при скачках потока газа в реактор

При травлении микроструктур в реакторах низкого давления потоки газообразных продуктов травления в объеме реактора сопоставимы с потоками плазмообразующих газов. Изменение химического состава продуктов травления и травящейся поверхности не может не сказаться и на параметрах заряженных компонентов плазмы – ионной (n_{i+} , n_{i-}) и электронной плотностях, а также на функции распределения электронов по энергиям и электронной температуре. Для этих измерений зондовый метод является наиболее подходящим.

Обширный набор параметров, получаемый при зондовом измерении предполагает необходимость выбора оптимального (для заданной микроструктуры, химии плазмы, параметров процесса) зондового сигнала. В качестве критерия для применимости зондового сигнала предложено следующее условие:

$$R_2^1 = \frac{\Delta A}{(a_1 + a_2)/2} \gg 1, \quad (1)$$

где ΔA абсолютное значение изменения, a_1 и a_2 стандартное отклонение сигнала, оцененное в стационарной области, отвечающей травлению верхнего и нижнего материалов соответственно. Т.е. систематическое изменение сигнала должно превосходить шумовые флуктуации (аналитический сигнал).

Экспериментальное определение момента окончания травления зондовым методом продемонстрировано в плазме ($\text{SF}_6 + \text{O}_2$), создающей оксидные пленки. Характерные зависимости параметров плазмы в процессе травления трехслойной затворной МОП-структуры poly-Si/SiO₂/c-Si в плазме $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ ($P = 5,5$ мТорр, $W_{RF} = 800$ Вт) показаны на Рис. 6-7. Моменты ступенчатого изменения зондовых токов и электронной температуры плазмы совпадают с моментами достижения границы poly-Si/SiO₂ и SiO₂/c-Si, что подтверждается эмиссионным спектральным мониторингом плазмы.

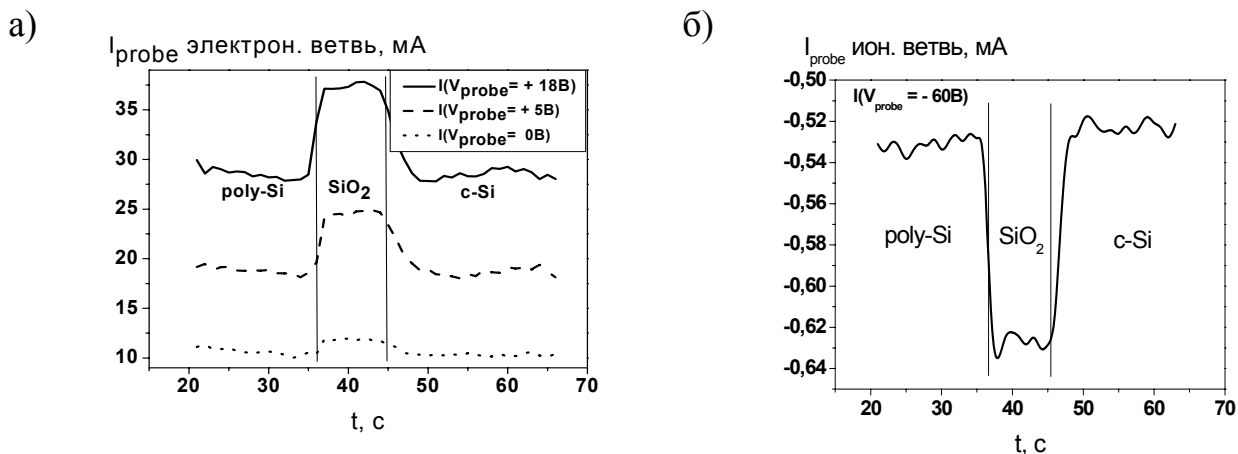


Рис. 6. Травление структур poly-Si/SiO₂/c-Si: а) ток зонда (I_{probe}) при выбранном фиксированном потенциале (V_{probe}) в электронной ветви ВАХ, б) ток зонда (I_{probe}) при выбранном фиксированном потенциале (V_{probe}) в ионной ветви ВАХ

Величины шумов a_i для зондового тока в электронной ветви ВАХ зонда слабо зависят от зондового потенциала, в то время как ΔA монотонно увеличивался по мере увеличения V_{probe} (Рис.6а).

Критерий (1) выполняется наилучшим образом для электронного тока насыщения, где R достигает значения 10. Для зондового тока в области ионного насыщения (Рис. 6б) $R \sim 10$, что также позволяет отнести его к аналитическим сигналам. В то же время в области ВАХ, в которой зондовый ток формируется при участии положительных ионов и электронов, сигнал оказался наименее чувствительным к моменту окончания травления, в таком случае $\Delta A \sim (a_{poly} + a_{SiO_2})$.

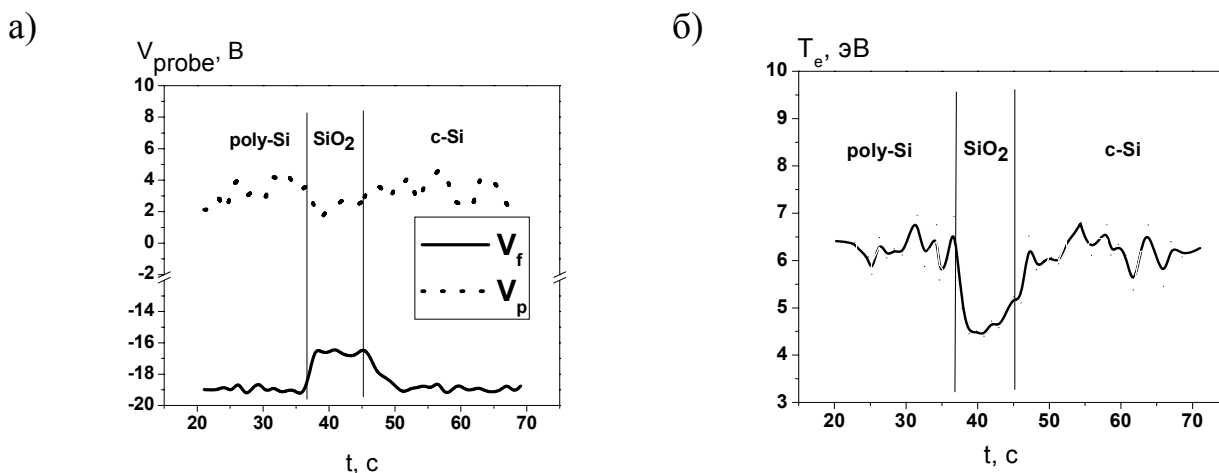


Рис. 7. Травление poly-Si/SiO₂/c-Si: а) потенциал плазмы (V_p) и плавающий потенциал (V_f), б) электронная температура (T_e)

Рис. 7а показывает временную зависимость потенциала плазмы и

плавающего потенциала, измеренную *in situ*. Потенциал плазмы флуктуирует в диапазоне $+2 \div +3$ В, и не может быть использован для детектирования окончания травления. Это является общим для всех исследованных технологических условий. Значения ΔA для величины V_p не превосходили дисперсии сигнала. Плавающий потенциал зонда V_f изменяется на границе р-Si/SiO₂ довольно отчетливо, и может служить аналитическим сигналом, отношение $R \sim 7$. Причина увеличения V_f при слабо меняющемся потенциале плазмы состоит в существенном уменьшении электронной температуры плазмы при дотравливании поликремния до границы с диэлектриком (Рис. 7б).

В таблице 2 приведены данные, полученные в одном из процессов травления, на основе полного анализа ВАХ, измеренных *in situ*, и значения параметров плазмы в незагруженном реакторе при одинаковых параметрах разряда.

Таблица 2. Параметры плазмы SF₆/O₂/Ar при травлении разных материалов

| n_{i+} , см ⁻³ | n_e , см ⁻³ | T_e , эВ | V_f , В | V_p , В | Поверхность, контактирующая с плазмой SF ₆ /O ₂ /Ar |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|--|
| $1,4 \cdot 10^{11}$ | $5,6 \cdot 10^{10}$ | 5,3 | -18,0 | +2,0 | Поликремний (poly-Si) |
| $1,6 \cdot 10^{11}$ | $7,4 \cdot 10^{10}$ | 4,8 | -17,0 | +2,0 | SiO ₂ |
| $1,4 \cdot 10^{11}$ | $5,6 \cdot 10^{10}$ | 5,3 | -18,0 | +2,0 | Кремниевая подложка (c-Si) |
| $1,5 \cdot 10^{11}$ | $8,7 \cdot 10^{10}$ | 4,3 | -10,0 | +8,0 | Пустая камера (нерж. сталь) |

Для подтверждения возможности диагностики момента окончания травления методом ДЛЗ в полимерообразующей плазме был проведен эксперимент в пленкообразующей плазме смеси CF₄ (95%) and O₂ (5%) при травлении структуры (Si₃N₄/SiO₂/c-Si) со следующими внешними параметрами разряда: $P = 3,0$ мТорр, $W_{RF} = 800$ Вт. Для учета возможных практических трудностей, связанных с реализацией метода в промышленных установках травления, был выбран режим с низкой селективностью травления, неполной загрузкой камеры (35% площади), отключена термостабилизация пластины.

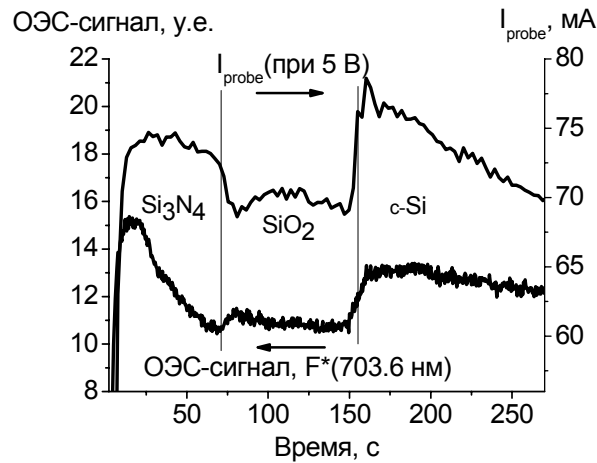


Рис. 8. Травление структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ - сравнение зондового (зондовый ток при потенциале плазмы) и ОЭС сигналов

На рис. 8 приведены результаты измерений зондового сигнала (зондовый ток при $V_{\text{probe}}=V_p$) и ОЭС линии фтора $F^*(703,6 \text{ нм})$. Несмотря на наклонный тренд сигнала, обусловленный нагревом пластины, систематическое изменение зондового сигнала позволяет уверенно выделить момент окончания травления на границах $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$.

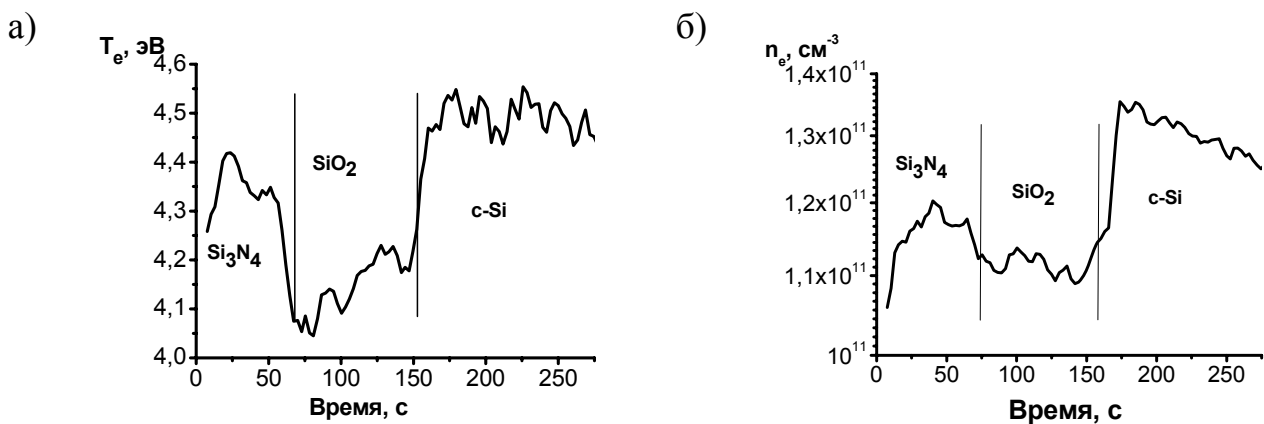


Рис. 9. Травление структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$: а) электронная температура (T_e) в предположении максвелловской ФРЭЭ, б) концентрация электронов

На рис. 9а приведен график электронной температуры, вычисленной в реальном времени в предположении максвелловской ФРЭЭ. На Рис. 9б показано изменение концентрации электронов плазмы в процессе травления. Установлено, что концентрация электронов претерпевает значительные изменения и пригодна для детектирования момента окончания травления на обеих границах $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ и $\text{SiO}_2/\text{c-Si}$. Среднее стандартное отклонение этого параметра составляет около $2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Шумовая компонента в измеренных

значениях концентрации положительных ионов достигает $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, что значительно превышает ожидаемый диапазон изменения этого сигнала и делает его применение для детектирования момента окончания травления невозможным.

Поскольку концентрации электронов (n_e), положительных ионов (n_{i+}) и отрицательных ионов (n_{i-}) связаны соотношением $n_e = n_{i+} - n_{i-}$, но только n_e и n_{i+} могут быть измерены независимо. Предполагается, что причиной флуктуаций ионной плотности при неизменной электронной плотности являются флуктуации баланса плотностей ионов (электроотрицательности плазмы).

Эта гипотеза подтверждается анализом ионного тока насыщения график которого показан на Рис. 10. В отличие от случая плазмы $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ ионный ток флуктуирует значительно сильнее, что делает его малоприменимым для детектирования момента окончания травления.

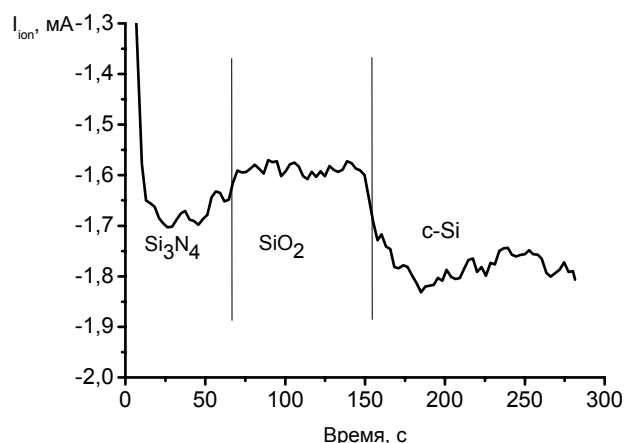


Рис. 10. Травление структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ – ионный ток

Характеристики плазмы, измеренные во время травления соответствующих слоев, а также в пустой камере приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Параметры плазмы $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ при травлении разных материалов

| n_{i+} , см^{-3} | n_e , см^{-3} | T_e , эВ | V_f , В | V_p , В | Поверхность, контактирующая с плазмой CF_4/O_2 |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|---|
| $1,5 \cdot 10^{11}$ | $1,2 \cdot 10^{11}$ | 4,3 | -18 | 4,0 | Si_3N_4 |
| $1,5 \cdot 10^{11}$ | $1,1 \cdot 10^{11}$ | 4,1 | -16 | 4,0 | SiO_2 |
| $1,5 \cdot 10^{11}$ | $1,4 \cdot 10^{11}$ | 4,5 | -17 | 5,0 | Кремниевая подложка (c-Si) |
| $1,6 \cdot 10^{11}$ | $1,2 \cdot 10^{11}$ | 4,4 | -16 | 4,7 | Пустая камера (нерж. сталь) |

Важным требованием к технологическим процессам является стабильность и воспроизводимость результатов ПХТ при последовательной обработке ряда пластин. Накопление пленок на стенках реактора (переосаждение) приводит к существенным изменениям химических и электрофизических параметров плазмы, что ведет к дрейфу параметров процесса и отражается на качестве получаемых микроструктур.

Для оценки состояния камеры в работе предложено использовать измерения параметров плазмы в контрольной (референсной) плазме аргона между циклами обработки пластин. В ходе исследования установлено, что наибольшей чувствительностью к состоянию стенок обладает потенциал референсной плазмы (V_p).

Выполненный эксперимент повторяет условия, характерные для последовательности процессов травления в полимерообразующей плазме партии пластин и плазмохимической чистки реактора. В ходе экспериментов измерялись параметры плазмы аргона ($P = 8$ мТорр, $W_{RF} = 600$ Вт) сначала между циклами травления структур, а затем – между циклами чистки реактора. Параметры процессов приведены в Таблице 4.

Таблица 4. Условия эксперимента

| Процесс | Состав плазмы | Давление, мТорр | W_{RF} , Вт | Длительность, с |
|---------------|-----------------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Травление (I) | C_4F_8 | 30 | 600 | 1500 |
| Чистка (II) | SF_6 | 5 | 600 | 70 |
| Чистка (III) | $SF_6(75\%)+Ar(25\%)$ | 5 | 600 | 180 |
| Чистка (IV) | $Ar(50\%)+O_2(50\%)$ | 5 | 600 | 600 |

На рис. 11 показана эволюция потенциала контрольной плазмы аргона. Наблюдалась сильная зависимость этого параметра от состояния стенок камеры. Установлено, что изменения V_p при загрязнении стенок потенциала плазмы в зависимости от состояния камеры составляют до 3 В, однако по завершении цикла чистки устанавливается значение $V_p = 11,7$ В (близкое исходному 11,9 В).

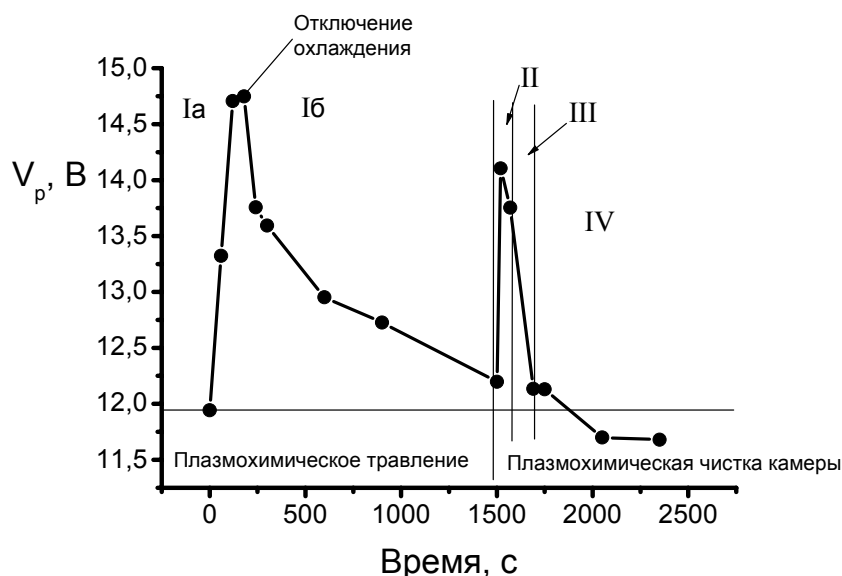


Рис. 11. Вариации потенциала плазмы Ar, вызванные процессами травления (область I – плазма C_4F_8) и чистки камеры (II – SF_6 , III – SF_6+Ar , IV – $Ar + O_2$), • - моменты измерений в контрольной плазме Ar

В области Ia (Рис. 11) происходит интенсивное осаждение пленок на холодных стенках реактора, которые частично десорбируются при их нагреве (Iб). Затем происходит удаление пленок по механизму травления в плазме SF_6 (область II) сопровождающееся потоком продуктов в объем реактора, распыление в плазме аргона (область III) и в плазме Ar и O_2 (область IV).

Таким образом, метод «контрольной плазмы» позволяет контролировать состояние стенок реактора и степень их очистки.

В Главе 4 предложены методы оптимизации процессов травления структур, содержащих диэлектрики, при помощи зондовой диагностики на основе анализа ФРЭЭ плазмы, измеряемой в ходе травления микроструктур.

Эксперимент по определению вида ФРЭЭ плазмы SF_6+O_2 был проведен при травлении структур poly-Si/SiO₂/c-Si. ФРЭЭ может быть вычислена при помощи двойного численного дифференцирования электронной ветви ВАХ $I_e(V)$ по известной формуле Дрювестайна:

$$f_e(V) = \frac{-4}{A_p e^2} \left(\frac{m_e (V_p - V_{probe})}{2e} \right)^{1/2} \frac{d^2 I_e(V)}{dV^2}, \quad (2)$$

где A_p – площадь поверхности зонда, m_e , e – масса и заряд электрона, соответственно. Основной трудностью при таком подходе является наличие

шумов в измеряемой $I_e(V)$ (обусловленных как естественными флуктуациями параметров плазмы, так и шумами дискретизации измерения напряжения и тока), вынуждающее применять процедуры сглаживания измеренной зависимости. Автором установлено, что наименьшие искажения исходных данных обеспечиваются при применении метода Савицкого и Голая [7]. Метод позволяет выполнять сглаживание и дифференцирование экспериментальных наблюдений непрерывных зависимостей, выполненных на равномерной сетке, на основе локальной полиномиальной аппроксимации экспериментальной зависимости. Для применения предложенного метода необходим физически осмысленный выбор параметров метода — количества точек для усреднения и степени полинома, обеспечивающий отсутствие артефактов и сохранение характерных особенностей вида ФРЭЭ.

Корректность метода была проверена на ФРЭЭ смеси аргона и гелия, которая, как известно [8], в диапазоне давлений $p < 10$ мТорр в ВЧ ICP-плазме, обладает максвелловской ФРЭЭ в широком диапазоне вкладываемой в разряд ВЧ мощности. Нормированные ФРЭЭ приведены на Рис. 12. Видно, что для плазмы инертных газов (кривая а) вычисленная ФРЭЭ весьма близка к максвелловской ($T_e=3,1$ эВ при $p = 5$ мТорр, $W_{RF} = 600$ Вт), за исключением области самых медленных электронов, $\varepsilon < 2$ эВ, в которой сказываются как ошибки численного дифференцирования дискретной экспериментальной зависимости, так и принципиальные недостатки зондового метода — условия сбора медленных электронов зондом весьма чувствительны к состоянию его поверхности. ФРЭЭ в плазме технологической смеси $SF_6/O_2/Ar$ при том же давлении и вкладываемой ВЧ-мощности (кривая б на Рис. 15) свидетельствует, что смена химии плазмы привела к значительным изменениям в энергетическом распределении электронов, которое приобрело вид бимакселловской ФРЭЭ с температурой холодных электронов $T_{cold} = 2,3$ эВ и горячих $T_{hot} = 5,5$ эВ.

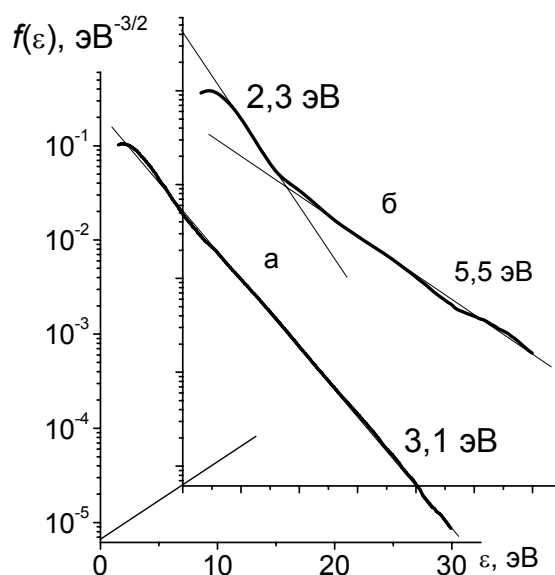


Рис. 12. Функция распределения электронов по энергиям $f(\varepsilon)$ в плазме Ag (a) и рабочей смеси газов $SF_6/O_2/Ar$ при отсутствии пластины в реакторе (ICP-источник, 13.56 МГц). $W_{RF} = 600$ Вт, $p = 5$ мТорр

В отличие от бимаксвелловской ФРЭЭ, наблюдаемой в СВЧ ЭЦР разрядах, в данном случае трансформация ФРЭЭ происходит с переходом от атомарного к молекулярным электроотрицательным газам в одном и том же типе ВЧ ICP-разряда. Возможной причиной являются дополнительные механизмы потерь энергии электронов в неупругих процессах (в частности резонансные пики неупругих потерь в области 8-12 эВ в сечении рассеяния электронов на нейтральных молекулах SF_6).

Присутствие в реакторе обрабатываемой пластины ведет к дальнейшим трансформациям ФРЭЭ, показанным на Рис. 14 ($p = 5,5$ мТорр, $W_{RF} = 600$ Вт, $W_{bias} = 50$ Вт), причем вид ФРЭЭ зависит от материала слоя подвергнутого травлению. В обоих случаях наблюдается обеднение высокоэнергетичной части ФРЭЭ (в большей степени для случая травления оксида кремния), а также, значительное отклонение от максвелловского вида распределения в области $\varepsilon = 10-15$ эВ. Последнее может быть связано с наличием каналов стока электронов в столкновительных процессах при указанных энергиях. Если скорость установления равновесного распределения по энергиям недостаточно высока, то наличие таких каналов должно вести к обеднению стационарной наблюдаемой ФРЭЭ, по сравнению с максвелловской, в тех диапазонах

энергии, в которых гибель электронов наиболее вероятна. Кроме того, ФРЭЭ при травлении поликремния отличается от случая, когда травится SiO_2 . Видно, что электроны в плазме, содержащей продукты травления оксида кремния, ближе к максвелловскому распределению по энергиям, чем электроны плазмы, содержащей продукты травления поликремния.

Общие тенденции изменений вида ФРЭЭ во всех проведенных процессах оставались такими же, как на Рис. 13. Однако степень отклонения ФРЭЭ от максвелловской, наблюдаемая в экспериментах, сильно зависит от внешних параметров разряда. Отклонение от равновесной ФРЭЭ для фторсодержащей плазмы при травлении кремния увеличивается с понижением вкладываемой мощности. В случае низких давлений ($p \sim 2$ мТорр) рабочей смеси в камере распределение близко к бимакселловскому, наблюдаемому в незагруженном реакторе. Для относительно больших давлений (5,5 мТорр) наблюдается максимальное отклонение стационарной ФРЭЭ от максвелловской. Происходит сильное обеднение высокоэнергетичной части ФРЭЭ — при $\varepsilon > 20$ эВ, а в области $\varepsilon = 10 - 15$ эВ она становится немонотонной — образуется локальный минимум.

Таким образом, детальное исследование энергетического распределения электронов плазмы в ходе травления микроэлектронных структур показывает его сильную зависимость, как от условий разряда, так и от состава плазмы. Трансформация ФРЭЭ в плазме, изменение T_e в ходе плазмохимического травления poly-Si/SiO₂/c-Si должны оказывать значительное влияние на поток электронов на поверхность структуры, ее зарядку, и связанные с ней негативные эффекты [9] нескомпенсированной зарядки.

Показано, что наибольшим трансформациям подвергалась именно высокоэнергетичная область ФРЭЭ, играющая основную роль в эффекте зарядки, в то время как температура основной массы электронов в ходе травления изменялась не столь значительно.

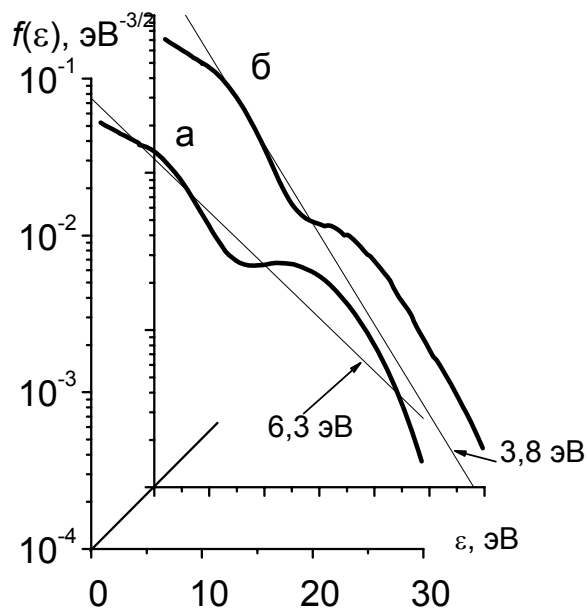


Рис. 13. Функция распределения электронов по энергиям $f(\varepsilon)$ в плазме $SF_6/O_2/Ar$, измеренная *in situ* при плазменном травлении структур p-Si/SiO₂/Si (ICP-источник, 13,56 МГц, $W_{RF} = 600$ Вт, $p = 5,5$ мТорр): а) во время травления слоя p-Si ($T_{eff} = 6,3$ эВ); б) во время травления слоя SiO₂ ($T_{eff} = 3,8$ эВ).

Таким образом, зондовый метод может быть целенаправленно использован для подбора технологических режимов, обеспечивающих уменьшение горячих хвостов ФРЭЭ и минимизацию эффекта зарядки.

В **Заключении** диссертации изложены основные выводы, содержащие научную новизну работы.

В **Приложениях I-III** приведены описание и основные технические характеристики разработанного автоматизированного комплекса зондовой диагностики и программного обеспечения, реализующего измерения методом динамического ленгмюровского зонда и измерения параметров плазмы в реальном времени для проведения диагностики момента окончания травления.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

А1. С. Н. Аверкин, К. А. Валиев, **А. В. Мяконьких**, А. А. Орликовский, К. В. Руденко, А. А. Рылов, Я. Н. Суханов, И. А. Тюрин, А. В. Фадеев, А. Е. Юрков. Разработка низкотемпературных плазмохимических процессов и серии плазменных установок для микро- и нанотехнологий. // Труды ФТИАН «Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника», 2005, т. 18, с. 121-137.

- A2. **A. Miakonkikh**, K. Rudenko. Measurement of polymerizing fluorocarbon plasma parameters: Dynamic Langmuir probe technique application, // ICMNE-2005, Book of Abstracts, 2005, p. P1-41.
- A3. **A. Miakonkikh**, K. Rudenko. Measurement of polymerizing fluorocarbon plasma parameters: Dynamic Langmuir probe technique application, // Proceedings of SPIE, 2006, v. 6260, p. 6260-0A.
- A4. К.В. Руденко, **А.В. Мьяконьких**, А.А. Орликовский, А.Н. Пустовит. Зондовые измерения параметров плазмы в технологических HDP-реакторах микроэлектроники в условиях осаждения диэлектрических пленок. // Микроэлектроника, 2007, т. 36, №1, с. 17-30.
- A5. К.В. Руденко, **А.В. Мьяконьких**, А.А. Орликовский. Мониторинг плазмохимического травления структур poly-Si/SiO₂/Si: зонд Ленгмюра и оптическая эмиссионная спектроскопия. // Микроэлектроника, 2007, т. 36, №3, с. 206-221.
- A6. K. V. Rudenko, **A. V. Miakonkikh**, V. F. Lukichev and A. A. Orlikovsky. *In situ* Langmuir probe diagnostics of poly-Si/SiO₂ etching: plasma parameters and end-point detection// Book of Abstracts, PESM-2007.
- A7. **A.V. Miakonkikh**, K.V. Rudenko and A.A. Orlikovsky. Langmuir-Probe applications in monitoring of plasma etching. // ICMNE-2007, Book of Abstracts, 2007, p. O3-24.
- A6. **А.В. Мьяконьких**, К.В. Руденко, А.А. Орликовский. Возможности мониторинга плазмохимического травления методом зонда Ленгмюра. // Труды ФТИАН «Квантовые компьютеры, микро- и нанoeлектроника», 2008, т. 19, с. 87-110.
- A9. **A.V. Miakonkikh**, K.V. Rudenko and A.A. Orlikovsky. Langmuir-Probe applications in monitoring of plasma etching. // Proceedings of SPIE, 2008, v. 7025, p. 7025-0F.
- A10. **A. Miakonkikh**, K. Rudenko. Application of Langmuir probe technique in depositing plasmas for monitoring of etch process robustness and for end-point detection, // ICMNE-2009, Book of Abstracts, 2009, p. O2-06.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Technology Roadmap for Semiconductors. 2008 Edition.
2. Руденко К.В., Суханов Я.Н., Орликовский А.А. Диагностика *in situ* и управление плазменными процессами в микроэлектронной технологии // Раздел V, Гл. 1, в кн. «Энциклопедия низкотемпературной плазмы» / Под ред. Ю.А.Лебедева, Н.А. Платэ, В.Е. Фортова. М.: «Янус-К», 2006. Т. XII-5. С. 381 - 436.
3. Каган Ю.М., Перель В.И. Зондовые методы исследования плазмы. // УФН, т.LXXXI, вып.3, с.409-452 (1962)
4. Ершов А.П., Калинин А.В., Суханов Я.Н., Руденко К.В. Применение зонда Ленгмюра для определения момента окончания процесса травления SiO₂ на кремнии. //Вестн. Моск. Ун-та. Сер.3 Физика, Астрономия. Т.36, №6, с.18-22. (1995).
5. Chen F.F. Langmuir probe analysis for high density plasmas. // Ed by Univ. of California, Los Angeles, LTP-006, 34 pp. (2000)
6. Kim J.S., Rao M., Cappelli M.A. et al. Mass spectrometric and Langmuir probe measurements in inductively coupled plasmas in Ar, CHF₃/Ar and CHF₃/Ar/O₂ mixtures. // Plasma Src. Sci. Technol., v. 10, pp. 191-210, (2001).
7. Savitzky A. and Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. // Analyt. Chem., v. 36, no. 8, p.1627-1639 (1964).
8. Kimura T., Ohe K. Investigation of electronegativity in a radio-frequency Xe/SF₆ inductively coupled plasma using a Langmuir probe. // Appl. Phys. Lett., 2001, v. 79, no. 18, p.2874-2876.
9. S. J. Fonash. Plasma processing damage in etching and deposition. // IBM J. Research and Development. 1999, v.43, no 1/2, p. 103-127.