

## Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу  
Курчикова Константина Алексеевича

### **“Модификация пористых материалов с низкой диэлектрической проницаемостью под действием ультрафиолетового излучения. Контроль уровня ультрафиолетового излучения плазмы”**

представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.08 – физика плазмы

В последние годы происходит непрерывное уменьшение размеров элементов интегральных микросхем, что вызывает повышенные требования к качеству изолирующих материалов и требования к уменьшению паразитных емкостей. Одним из перспективных направлений при решении данной задачи является уменьшение диэлектрической постоянной материалов, создание так называемых “low- $k$  материалов”. Диссертация посвящена исследованию изменения свойств таких материалов в процессе изготовления интегральных микросхем, когда low- $k$  материал подвергается воздействию ультрафиолетового (УФ) излучения и активных радикалов, которые нарабатываются в обрабатывающих микросхему разрядах. Поэтому актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Во введении обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна и практическая значимость решаемых в работе задач, сформулированы цели и задачи. Кратко описаны содержание диссертации и ее структура.

Первая глава имеет обзорный характер, в которой рассмотрены существующие передовые low- $k$  материалы. В ней рассмотрены свойства различных материалов с низкой диэлектрической константой, способы их создания и диагностики, основные механизмы взаимодействия с плазмой в различных типах реакторов, кратко рассмотрены проблемы, возникающие при внедрении таких материалов в технологическое производство. Описаны материалы, исследуемые в представленной работе.

Во второй главе исследованы механизмы воздействия УФ излучения на передовые low- $k$  материалы, описаны используемые в работе экспериментальные установки, представлены исследования модификации пористых диэлектрических пленок под действием излучения со следующими длинами волн: 13.5 нм (излучение ионизованных паров олова), 58 нм (излучение атомов гелия), 106 нм (излучение атомов аргона), 147 нм (излучение атомов ксенона) и 193 нм (излучение ArF лазера). Описана теоретическая модель, позволяющая интерпретировать полученные экспериментальные результаты. Также представлено исследование влияния пористости на механизмы воздействия УФ излучения на low- $k$  материалы.

В третьей главе проведен обзор оптических эмиссионных методов диагностики для определения концентрации возбужденных атомов, концентрации электронов и функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Показана основная идея оптического эмиссионного метода диагностики, а также кратко представлены альтернативные методы плазменной диагностики.

В четвертой главе описаны два метода, используемых для определения концентрации атомов на первых четырех возбужденных уровнях в высокочастотном емкостном разряде в аргоне. Представлены экспериментальные установки и полученные результаты. Обсуждается возможность определения интенсивности УФ излучения из известных значений концентраций резонансных состояний. Предложен механизм снижения интенсивности УФ излучения путем добавления примесей молекулярных газов.

В пятой главе представлена столкновительно-радиационная модель, на основе которой выполнен анализ полученных в четвертой главе результатов.

В заключении автор приводит основные результаты и выводы диссертационной работы.

*Основными достижениями автора следует признать следующие:*

1. Исследование механизма модификации различных пористых low- $k$  образцов под воздействием УФ излучения, соответствующего пяти различным длинам волн излучения атомов, разряд в которых может быть использован при изготовлении микросхем, излучения плазмы паров олова, которая предлагается для литографии, и излучение ArF лазера, которое уже используется для этих целей.
2. Установление того, что наибольшая деградация исследуемых low- $k$  пленок происходит при их взаимодействии с УФ излучением плазмы ксенона с длиной волны 147 нм и что наибольшая деградация пористых пленок достигается в случае, когда УФ излучение проникает на всю глубину пленки.
3. Установление того, что деградация low- $k$  пленок существенным образом увеличивается при увеличении значения пористости.
4. Реализация двух независимых оптических методов диагностики концентраций первых четырех возбужденных состояний в высокочастотном емкостном разряде аргона: в первом концентрации измерялись методом самопоглощения линий излучения возбужденных атомов, а во втором на основе измерения отношений интенсивностей спектральных линий излучения.
5. Исследование поведения населенностей двух метастабильных и двух нижних резонансных уровней атома аргона от концентрации электронов. Построение столкновительно-радиационной модели, на основе которой проведен анализ полученных результатов. Показано, что основным каналом опустошения резо-



нансных уровней является радиационный распад, а метастабильных уровней – девозбуждение электронным ударом. На основе построенной модели совместно с зондовыми измерениями показано, что функция распределения электронов по энергиям существенно отличается от максвелловской.

При рассмотрении диссертационной работы Курчикова К.А. следует остановиться и на имеющихся в ней недостатках:


1. На рис. 1 приведены  $PT$  диаграммы процесса образования кремниевой пленки при разных значениях параметра  $X = S/V$  ( $V$  – объем CVD реактора,  $S$  – суммарная площадь внутренней поверхности реактора и поверхности подложки). Ни в тексте, ни в подписях к рисунку не указано, как соотносятся величины  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ .
2. При описании структуры диоксида кремния на стр.15 допущена ошибка. В структуре  $SiO_2$  каждый атом кремния соединен с четырьмя атомами кислорода, а каждый атом кислорода соединен с только с двумя атомами кремния, а не с четырьмя, как указано в диссертации.
3. На рис. 4 по оси абсцисс согласно подписи к этому рисунку должны быть энергии рентгеновских фотонов. Здесь допущена ошибка, так как интервал от 0 до 2 эВ никак не относится к рентгеновскому излучению.
4. На стр. 24 есть не совсем верное утверждение о том, что “Когда пары олова заполняют промежуток между электродами, возникает замкнутая электрическая цепь, по которой начинает течь ток.” Пары олова не проводят ток, для этого их надо ионизовать или нагреть до достаточно высокой температуры, чтобы стала заметной термическая ионизация. Поэтому нужно указать, до каких температур разогревались пары олова.
5. Автор для суммарного числа фотонов, упавших на единицу площади, как в тексте, так и в подписях к рисункам 9-11, 13 и 15, использует слово «поток», что неверно.
6. Для измерений интенсивности УФ излучения на всех установках используется детектор AXUV100G. Поэтому было бы хорошо привести спектральную чувствительность этого детектора.

Отмеченные недостатки, однако, не влияют на общую высокую оценку рассматриваемой работы. Автор проделал большую работу, полученные в диссертации результаты и выводы обоснованы и достоверны, что подтверждается тщательностью проведения экспериментов и теоретических оценок с использованием известных в литературе теоретических методов. Личный вклад Курчикова К.А. представляется

определяющим, все основные результаты диссертации получены при его непосредственном участии. В целом диссертация Курчикова К.А. представляется завершенным научным исследованием, которое вносит заметный вклад в развитие физики низкотемпературной плазмы. Полученные в ней результаты имеют принципиальную новизну и практическую ценность для понимания процессов в материалах с низким значением диэлектрической постоянной и с высокой пористостью при воздействии на них низкотемпературной плазмы. Результаты диссертации известны специалистам, достаточно полно представлены в публикациях в научных изданиях и докладывались на отечественных и зарубежных научных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Курчикова Константина Алексеевича **“Модификация пористых материалов с низкой диэлектрической проницаемостью под действием ультрафиолетового излучения. Контроль уровня ультрафиолетового излучения плазмы”**, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – *физика плазмы*, полностью соответствует критериям, установленным действующим *“Положением о порядке присуждения ученых степеней”* №842 от 24.09.2013 г., а сам Курчиков Константин Алексеевич безусловно заслуживает присуждения ему искомой степени по специальности 01.04.08 – *физика плазмы*.

Д.ф.-м.н., начальник отдела Акционерного общества  
«Государственный научный центр Российской Федерации  
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142190 г. Троицк,  
г. Москва, ул. Пушкиных, владение 12,  
эл. почта: fav@triniti.ru, раб. тел +7 (495) 8415262

  
23.11.2015

А.В. Филиппов

Подпись А.В. Филиппова заверяю:  
Ученый секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»  
кандидат физико-математических наук

  
А.А. Ежов