

ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертационной работе **Фадеева Алексея Владимировича «Исследование латеральной однородности плазмы в реакторах микроэлектроники методами двухракурсной эмиссионной томографии»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертация А.В.Фадеева посвящена созданию и экспериментальной апробации алгоритма двухракурсной эмиссионной томографии плазмы применительно к технологическим плазмохимическим реакторам с удаленным источником плотной плазмы.

Актуальность работы обусловлена тем, что для современного промышленного производства интегральных схем необходимы плазмохимические реакторы, позволяющие обрабатывать пластины диаметром 450 мм. Сложность физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии низкотемпературной химически активной плазмы с поверхностью, не позволяет в настоящее время проводить адекватное моделирование плазменных технологических реакторов. Поэтому особую роль приобретают экспериментальные методы диагностики параметров плазмы в таких системах. Ключевым параметром, ответственным за качественные характеристики структур интегральных схем, является пространственная однородность компонентов плазмы в реакторе. Для мониторинга возможных неоднородностей концентрации частиц плазмы, которые не должны превышать 2 % в непосредственной близости от обрабатываемых пластин, необходимо разработать бесконтактные методы диагностики. Одним из таких методов является эмиссионная томография, позволяющая восстановить пространственное распределение исследуемых заряженных или нейтральных частиц. Для этого разработаны различные математические алгоритмы, применяемые, например, в томографии в медицинских целях. Но в медицинских томографах для реконструкции объекта используется большое число ракурсов сканирования. Однако на промышленных реакторах плотной плазмы низкого давления для вывода эмиссионного излучения имеется один или два оптических порта. Поэтому применять классические алгоритмы реконструкции пространственного распределения частиц в промышленных реакторах плотной плазмы нельзя без их модернизации.

Исходя из этого, перед А.В.Фадеевым была поставлена **задача** по разработке оптимальной томографической схемы двухракурсного веерного сканирования промышленного плазмохимического реактора. Хотелось бы сразу отметить, что соискатель с поставленной перед ним задачей успешно справился. Им разработан алгоритм и оригинальное программное обеспечение для реконструкции пространственного распределения частиц плазмы по ее эмиссионному излучению. Проведена верификация алгоритма реконструкции в модельном эксперименте по восстановлению пространственного распределения ионов аргона в реакторе при использовании аргона в качестве плазмообразующего газа. Это позволило автору в дальнейшем провести в реальных условиях современного технологического реактора плотной плазмы низкого давления мониторинг двумерного распределения ионов B^+ и нейтральных радикалов F^* в плазме трифторида бора BF_3 с использованием двухракурсной эмиссионной томографии.

Диссертация А.В.Фадеева состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемых работ и приложения, в котором представлены коды программы томографической реконструкции на языке C^{++} , отражающие основные элементы предлагаемого алгоритма. В конце каждой главы приведены краткие выводы, в которых излагаются полученные в данном разделе результаты. Общие выводы по работе приведены в конце диссертации в разделе Заключение.

Во введении обоснована актуальность работы, определены основные задачи и цели исследования, сформулированы научная новизна диссертации и выносимые на защиту положения, а также дано краткое описание работы.

Первая глава диссертации является обзорной, в которой рассмотрены классические методы восстановления пространственного распределения параметров исследуемого объекта, а также основные проблемы, возникающие при применении для этой цели малоракурсной томографии. В шестидесятых годах прошлого века академик А.Н. Тихонов создал концепцию обратных и некорректных задач, а также разработал методы регуляризации. Он неоднократно подчеркивал сложность решения некорректно поставленных задач, утверждая, что это является в такой же степени наукой, как и искусством. При решении некорректных задач могут появляться объекты, реально отсутствующие в области реконструкции.

Следует отметить, что данная глава явно перегружена формулами (всего 86 формул), заимствованными из оригинальных работ других авторов.

Во второй главе предложена модель поля томографической реконструкции диффузионной области плазмы в технологических реакторах с удаленной зоной

плазмообразования при двухракурсной схеме сканирования. Алгоритм реконструкции включает в себя определение фона и последовательное определение параметров всех элементарных неоднородностей в порядке убывания амплитуды. Проведенные исследования показали, что лучше всего для начальной двухракурсной реконструкции подходят методы свертки и максимума энтропии. Установлено, что работа предложенного алгоритма обеспечивает удаление артефактов реконструкции.

В третьей главе диссертации приведены результаты оптимизации предложенного базового алгоритма реконструкции, который был опробован на физической модели в виде трех пространственно-протяженных источников света в геометрии, повторяющей геометрию камеры технологического реактора.

Четвертая глава диссертации посвящена верификации предложенного автором алгоритма и экспериментальному исследованию двумерного распределения ионов и химически активных радикалов в технологической плазме в камере экспериментального реактора. Полученные автором результаты позволяют предположить, что метод двухракурсной эмиссионной томографии будет использоваться в масштабах реального времени в качестве основного для мониторинга состояния технологических плазмохимических реакторов.

Работа А.В.Фадеева является законченным научным исследованием, выполнена на достаточно высоком уровне, полученные им основные результаты являются надежными, достоверность их подтверждается верификацией предложенных алгоритмов восстановления пространственных распределений заряженных и нейтральных частиц в объеме камеры реального технологического плазмохимического реактора.

Тем не менее, считаю необходимым указать на определенные недостатки работы.

1. Температура электронов не может быть определена из вольтамперных характеристик зонда Ленгмюра с той точностью, с которой на стр.120 представлены результаты измерений $T_e=3.23$ эВ, $T_e=2.04$ эВ, $T_e=1.47$ эВ.
2. На рис.4.5 представлены участки спектра BF_3 плазмы с добавлением 2% Ar с выделенными эмиссионными линиями, использованными для томографии. Отчетливо видно, что в условиях данного эксперимента разрешающая способность спектрографа не позволяет полностью разрешить выбранную автором линию $\text{Ar}^*(750.4 \text{ нм})$, которая частично перекрывается с двумя соседними линиями. На стр.129 автор пишет, что «на рис. 4.5 изображены ... , а также показан способ отсчета интенсивности излучения избранных спектральных линий». Считаю, что выбранный автором способ отсчета интенсивности линии не совсем удачен, так как необходимо учитывать вклад

- перекрывающихся с ней соседних линий, а также отсчет необходимо проводить от среднего уровня шума, а не от уровня минимума шума, как изображено на рис. 4.5.
3. В третьей главе приводятся результаты реконструкции трех пространственно-протяженных источников света (светодиодные лампы), имитирующих плазменные неоднородности. На стр.114 отмечается, что *«во всех случаях координаты источников света восстанавливались с точностью до размера ячейки сетки»*. Однако координаты таких источников точно определяются с помощью простого двухракурсного фотографирования. Что касается томографической реконструкции интенсивностей источников света, то для приближения к реальному плазмохимическому реактору модельный эксперимент следовало бы усложнить, добавив интенсивную фоновую шумовую засветку такого объекта на уровне, соизмеримом с интенсивностью свечения светодиодных ламп.
 4. Работа изобилует жаргонными выражениями, такими как: *гауссиана* вместо гауссовское распределение интенсивности; *латеральное* распределение вместо пространственное двумерное распределение; реконструкция заданных *фантомов* вместо реконструкции заданных модельных пространственных распределений интенсивности излучения и др. На стр. 49 текста диссертации и стр.7 автореферата автор вводит новое понятие – *сечение возбуждения атома* – вместо сечения возбуждения спектрального перехода. При представлении результатов автор неоправданно меняет масштаб и ракурс изображения (смотри, например, рис.2 автореферата, рис.2.23, рис.2.24 диссертации). В тексте диссертации на стр.100 утверждается, что *«окончательный результат реконструкции базовым алгоритмом дает результат с погрешностью реконструкции ~2%»*, однако на рис.3.3 эти данные не представлены.
 5. Имеются опечатки. На стр.9 автор утверждает, что *«для оптически тонкой плазмы, когда коэффициент поглощения $\chi < 1$, ...»*. Однако для оптически тонкой плазмы необходимо, чтобы произведение коэффициента поглощения χ на толщину поглощающего слоя l было много меньше единицы $\chi l < 1$. На стр.98 автор пишет, что *«... суперпозицию четырех перегреваемых Гауссовых пиков ...»*. Наверное, имеется в виду перекрывающихся пиков.

Приведенные замечания не снижают в целом хорошего впечатления от рассматриваемой работы и ее научной ценности. Полученные в диссертации результаты являются новыми, а выводы – обоснованными.

Основные положения, выносимые на защиту, соответствуют выбранной теме и подробно обоснованы в диссертации. Основные результаты работы в полной мере

опубликованы в научных журналах и трудах российских и международных конференций. Квалификационная ценность результатов исследований признана российским и международным научными сообществами.

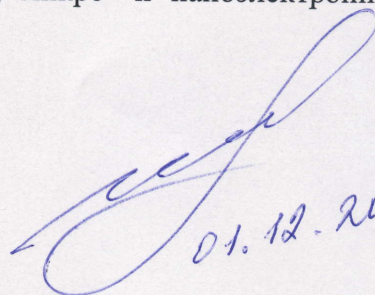
Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

Тема диссертационной работы А.В.Фадеева соответствует специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Представленные в диссертации результаты являются полезными для широкого круга исследователей и могут быть использованы в различных институтах, например, НИИФП (г.Зеленоград), МИЭТ (г.Зеленоград), ИПТМ РАН (г.Черноголовка), ИПФ РАН (г.Нижний Новгород), ИНХС РАН (г.Москва), ИОФ РАН (г.Москва), МГУ имени М.В. Ломоносова.

Считаю, что диссертационная работа **«Исследование латеральной однородности плазмы в реакторах микроэлектроники методами двухракурсной эмиссионной томографии»** отвечает всем требованиям "Положения о порядке присуждения ученых степеней" ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Фадеев Алексей Владимирович, несомненно заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Профессор физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук


01.12.2014г.

В.М.Шибков

Рабочий адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет МГУ
Рабочий телефон: (495)939-13-37 или (495)939-25-47
E-mail: shibkov@phys.msu.ru

Подпись В.М.Шибкова удостоверяю.

Декан
физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
профессор



Н.Н.Сысоев