

Отзыв

официального оппонента на диссертацию

Фадеева Алексея Владимировича

“Исследование латеральной однородности плазмы в реакторах микроэлектроники
методами двухракурсной эмиссионной томографии”,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 05.27.01 – “твёрдотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах”

Исследование однородности компонентов низкотемпературной плазмы при ее промышленном применении является важной задачей. При ее использование в технологических процессах микроэлектроники, однородность компонентов плазмы обеспечивает однородность скорости протекания этих процессов. Контактные и бесконтактные методы применяются для диагностики плазмы. При этом последние являются предпочтительными для задачи исследования ее однородности, поскольку введение зонда или датчика в плазму искажает параметры плазмы, а изучение динамики релаксации возмущений не входит в постановку задачи. Около 30 лет назад было предложено применить методы дискретной томографии для изучения плазмы. Был проведен анализ подходов к решению задачи, который позволил определить условия проведения экспериментов с точки зрения их геометрии, были созданы модели формирования сигналов, соответствующих проекционным данным, проведен выбор и обоснование методов интерполяции и экстраполяции для доопределения исходных массивов. Показано, что геометрия в конусных пучках определяет развитие контроля плазмы. Различными авторами, такими как Вишняков Г.Н., Воскобойников Ю.Е., Левин Г.Г., Пикалов В.В., Преображенский Н.Г. и др., было показано, что точность реконструкции определяется полнотой набора исходных данных, способами доопределения данных, параметрами дискретизации, адекватностью используемой процедуры обращения Радона. Однако, предложенные методы и подходы для решения задачи эмиссионной томографии плазмы, свойства которых были достаточно изучены, не показывают приемлемых результатов для условий измерения, в которых было бы желательно их применить сегодня. А именно, наличие только одного или двух геометрически

зафиксированных портов для вывода эмиссионного излучения плазмы в промышленных реакторах плотной плазмы низкого давления с цилиндрической симметрией. В связи с этим возникла необходимость создать и проверить, как с помощью привлечения аппарата математического моделирования, так и экспериментально, алгоритм двухракурсной эмиссионной томографии плазмы, который совместим с технологическими плазмохимическими реакторами с удаленным источником плотной плазмы. Все вышеизложенное подчеркивает новизну, актуальность и своевременность диссертационной работы А.В. Фадеева.

Научная новизна результатов, полученных в работе А.В. Фадеева, определяется следующим:

- впервые предложена модель, описывающая распределение частиц в низкотемпературной плазме, которая представима в виде суперпозиции однородного распределения частиц (фона) и конечного числа пространственных неоднородностей в распределении плотности частиц, аналитическое выражение формы которых зависит от типа частиц и их местоположения в области реактора;
- на основе предложенной модели разработан алгоритм и численно реализовано программное обеспечение для восстановления латерального распределения частиц плазмы по собранным в конусной схеме проекциям эмиссионной томографии;
- поведение алгоритма на множестве фантомов, сгенерированных с применением датчика случайных чисел, а также на экспериментальных данных, полученных из камеры реактора, продемонстрировало динамику, позволяющую использовать его для исследования однородности компонентов низкотемпературной плазмы в технологических процессах.

Достоверность полученных результатов подтверждается выбором физически обоснованных моделей, сопоставлением полученных результатов с результатами перекрестных измерений, позволяющих провести оценку качества результатов реконструкции. Практическая значимость диссертационной работы А.В. Фадеева не вызывает никаких сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 107 наименований и приложения с ключевыми программными кодами предложенного

автором алгоритма. Объем диссертации составляет 172 страницы, в том числе 63 рисунка, 2 таблицы.

Во введении описана актуальность выбранной темы, сформулированы цели работы, научная новизна и практическая значимость работы, дана мотивация достоверности полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена обзору современного состояния дел в области малоракурсной томографии плазмы. После описания математической модели формирования томографической проекции в параллельной схеме, представлены основы метода обратного проецирования с фильтрацией, метода реконструкции на базе Фурье преобразования и алгебраического метода реконструкции. Далее представлен вывод выражения для оператора обратного преобразования Радона в веерной геометрии, описан метод максимума энтропии и сформулированы проблемы, возникающие при малом числе ракурсов. Обзором методов реконструкции, созданных или адаптированных для малоракурсных измерительных схем, и постановкой задач, которые необходимо решить, чтобы достигнуть поставленных целей, завершается глава.

Во второй главе диссертации описана предлагаемая математическая модель поля реконструкции, с использованием данной модели рассчитан фантом и несколько классических алгоритмов реконструкции применены для реконструкции в двухракурсной параллельной геометрии, а алгоритмы свертки и максимума энтропии применены также в веерной геометрии. Сравнение результатов позволило диссертанту сделать вывод о неприменимости классических алгоритмов к двухракурсному случаю ввиду того, что нормированная среднеквадратичная ошибка превышает 30%, в некоторых случаях указанное значение превышено в разы. Далее диссертант предлагает алгоритм удаления артефактов, применение которого к рассмотренным случаям, существенно уменьшает ошибку. Однако, как указывает А.В. Фадеев, существует ряд экспериментальных ограничений, которые не позволяют применять алгоритм в указанном виде, а требуют модификации алгоритма. После детального анализа ограничений, диссертант производит необходимую коррекцию алгоритма, что приводит к уменьшению ошибки реконструкции.

Третья глава диссертации посвящена проблеме исследования динамики поведения алгоритма на достаточно большой выборке фантомов. После анализа результатов испытаний алгоритма была проведена оптимизация поиска максимума на

изображении и добавлен контроль невязки в расчете лучевых сумм. После модификации алгоритм опробован на данных модельного эксперимента, имитирующего камеру плазмохимического реактора. Результаты реконструкции классическими методами и методом, предложенным диссертантом, показали несомненные преимущества последнего по числу вносимых артефактов.

Заключительная глава диссертации описывает применение алгоритма для реконструкции распределения ионов аргона по сечению реактора. Количественное несовпадение результатов реконструкции с зондовыми измерениями составляет 6%. Эксперимент по томографии плазмы BF_3 продемонстрировал устойчивое поведение алгоритма при различных значениях давления в камере реактора, при наличии демонтажа газораспределительной системы, при введенных искусственных неоднородностях магнитного поля.

В заключительной части перечисляются основные результаты, отражающие глубокую проработку материала.

В целом работа представляет собой законченное научное исследование, проведенное на высоком уровне. Однако, диссертационная работа А.В. Фадеева, не лишена недостатков:

1. Не совсем ясно, по какой причине диссертант использует зашумленный фон фантома при параллельной геометрии и не зашумленный при веерной во второй главе диссертации. Это не изменяет основных выводов, приведенных в конце главы, но могло бы изменить величину ошибки.
2. По рис. 2.12 можно только догадываться о точном месте положения регистрирующих устройств. Учитывая выводы, сделанные в разделе 2.4.2. задание точного положения регистрирующего устройства уменьшает ошибку реконструкции.
3. При описании результатов тестирования алгоритма на физической модели в виде трех источников света вопрос о качестве реконструкции обсуждается только на качественном уровне. Как пишет автор, комментируя (рис. 3.10) “показано хорошее согласие” в определении

положения источников света. Приведенная количественная оценка только усилила бы представляемый результат.

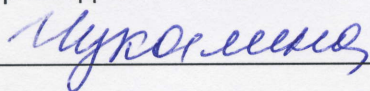
Указанные замечания не отменяют факта, что диссертация А.В. Фадеева является законченной научно-квалификационной работой. Все результаты исследований А.В. Фадеева опубликованы и докладывались на профильных российских и зарубежных конференциях. Содержание автореферата в полной мере соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа А.В. Фадеева выполнена на высоком научном уровне и отвечает всем требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а также соответствует паспорту специальности 05.27.01. Ее автор Алексей Владимирович Фадеев, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – “твёрдотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах”.

Старший научный сотрудник

лаборатории прикладной математики ИПТМ РАН,

к.ф.-м.н.



Чукалина М.В.

12 ноября 2014 г.

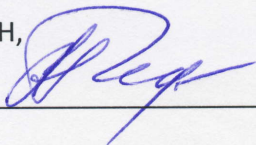
142432, Московская обл., Ногинский р-н, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6,
ИПТМ РАН, лаборатория прикладной математики

Тел.: +7-916-8066735, E-mail: chukalinamarina@mail.ru

Подпись М.В. Чукалиной заверяю.

Ученый секретарь ИПТМ РАН,

д.ф.-м.н.



Редькин А.Н.