

О Т З Ы В

**официального оппонента на диссертационную работу
Кулевого Тимура Вячеславовича “Источники пучков ионов твердотельных
веществ на основе вакуумного-дугового и пеннинговского разрядов для
экстремальных режимов ионной имплантации”, представленной на
соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
01.04.04 – «Физическая электроника».**

Целью работы является разработка ионных источников на основе вакуумного-дугового и пеннинговского разрядов и экспериментальной базы для проведения фундаментальных исследований и прикладных работ.

Актуальность диссертации определяется все возрастающей ролью ионных источников, используемых в различных установках, начиная от самых высокоэнергетических ускорителей заряженных частиц для исследований в области фундаментальной физики, таких как Большой адронный коллайдер (БАК) в ЦЕРН, и до ультра-низкоэнергетических имплантационных установок, используемых в современной полупроводниковой промышленности.

Научная новизна работы Т.В. Кулевого состоит в следующем:

1. Предложены и реализованы методы повышения средней зарядности тяжелых ионов пучка в результате инжекции пучка ускоренных электронов в плазму вакуумной дуги, а также в результате реализации ступенчатого дугового разряда в сильном нарастающем магнитном поле.
2. Предложен и реализован метод повышения зарядового состояния ионов в источнике ионов на основе разряда Пеннинга с катодом косвенного накала.

Метод основан на инжекции доли электронного пучка для накала катода в разрядный промежуток.

3. Разработаны принципы получения пучка молекулярных ионов с высоким содержанием бора в источниках, применяемых в промышленности, что позволило получать пучки без существенного изменения конструкции промышленных источников ионов с высокой интенсивностью. Возможно использование процесса очистки внутренней поверхности стенок рабочей камеры с включением кислорода в борсодержащие соединения.

4. На основе генерируемых ионных пучков разработаны и внедрены методики экспериментов для проведения прикладных исследований по экспресс-анализу радиационной стойкости конструкционных материалов, используемых в термоядерных реакторах.

5. Результаты работы значительно расширяют научные знания о механизмах генерации и формирования ионных пучков в вакуумно-дуговом и пеннинговском разряде для экстремальных режимов ионной имплантации, что может использоваться в технологиях создания полупроводниковых изделий, ускорителях тяжелых ионов, имитационных экспериментах по экспресс-анализу поведения конструкционных материалов для термоядерных реакторов. Это открывает возможность создания ионных имплантеров для кремниевых подложек с высокой плотностью пучка, сравнимой с достигаемой на атомарных пучках, а также организацию режима очистки разрядной камеры, что в совокупности решает важную проблему практического использования ионной имплантации. Предложенные подходы и технические решения защищены патентами РФ и США.

Практическая ценность работы можно сформулировать в следующих положениях:

1. Увеличение среднего заряда генерируемых ионных пучков позволяет сократить энергопотребление и размеры установок, используемых для ускорения ионов в научных и прикладных целях, в частности в ускорителях тяжелых частиц больших ускорительных комплексов, а также в установках для высокоэнергетической имплантации.

2. Способ обеспечения генерации многоатомных молекулярных ионов с высоким содержанием бора с организацией процесса самоочистки разрядной камеры позволил увеличить срок службы соответствующих ионных источников, полностью убрав проблему влияния на качество пучка продуктов диссоциации многоатомных борсодержащих молекул.

3. Создана экспериментальная база для проведения работ по исследованию фундаментальных процессов взаимодействия ионного пучка с энергией 101 кэВ/нуклон с плазменной и газовой мишенью, для которых на сегодняшний день нет точного теоретического описания.

4. Создана экспериментальная база для проведения экспресс-анализа радиационной стойкости конструкционных материалов, используемых или разрабатываемых для ядерных и термоядерных реакторов на основе имитационных экспериментов на пучках тяжелых ионов.

Выводы и результаты исследований, представленные в диссертации, являются надежно обоснованными и подтверждаются систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, проведением измерений на различных экспериментальных установках. Результаты работ опубликованы в большом количестве статей в ведущих научных журналах и неоднократно представлялись и обсуждались автором на международных и российских научных конференциях.

Диссертация Т.В. Кулевого состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 276 позиций.

Во введении обоснованы актуальность и цель поставленных задач, произведена оценка научной новизны и практической ценности работы. Перечислены научные положения, представленные к защите.

В первой главе, состоящей из трех разделов, приведен литературный обзор по ионным источникам, используемым для генерации пучков ионов металлов. Представлена оригинальная конструкция разработанного автором вакуумно-дугового источника металлов, предназначенного для использования на тяжело-ионном ускорителе с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (в англоязычной литературе RFQ). Конструкция данного источника стала отправной точкой для двух его модификаций, названных автором e-MEVVA и MEVVA-M, описание которых дано в этой главе. В источнике e-MEVVA реализована авторская идея повышения зарядового состояния генерируемых вакуумно-дуговым разрядом ионов за счет инжекции в область разряда пучка электронов. Приведены результаты, показывающие повышение зарядового состояния ионов урана и свинца. Результат подтверждается также данными, полученными в совместных исследованиях с ИСЭ СО РАН. В источнике MEVVA-M успешно реализована оригинальная идея автора по повышению зарядового состояния ионов за счет организации ступенчатого разряда в магнитном поле с высоким продольным градиентом индукции.

Во второй главе приведены результаты успешного применения в источнике пеннинговского типа идеи повышения зарядового состояния ионов, реализованной в источнике e-MEVVA. Инжекция части высокоэнергетического электронного пучка, предназначенного для разогрева катода с косвенным накалом, в область разряда и организация режима накопления данных ионов в этой области ведет к увеличению как максимально достигаемого зарядового состояния генерируемых ионов, так и среднего заряда извлекаемого ионного пучка. Проведенное численное моделирование показало, что термализация

высокоэнергетических электронов происходит за времена менее 15 мкс, что приводит к повышению средней энергии электронов в плазме разряда и, как следствие, к росту зарядового состояния ионов. Для проведения экспериментальных работ на основе численного моделирования разработана оригинальная конструкция транспортного канала от выхода ионного источника до токоприемника, располагаемого за магнитным масс-анализатором. В состав канала вошла двухзачорная оптическая система, формирующая ионный пучок, система из двух электростатических линз с квадрупольной составляющей, а также электростатический ондулятор.

В третьей главе представлены результаты разработки источника многоатомных борсодержащих молекулярных ионов для полупроводниковой промышленности. Необходимо отметить, что данным направлением, являющимся одним из перспективных в полупроводниковой промышленности, в нашей стране занимается только команда, руководимая автором диссертационной работы. Показано, что возможно получение пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионов с интенсивностью не менее 1 mA/cm^2 при энергии ионов пучка 4 кэВ, что для пучков ионов декаборана или карборана соответствует плотности тока 10 mA/cm^2 в пересчете на атомарный пучок ионов бора при энергии менее 300 эВ.

В четвертой главе представлены результаты работы по устранению основной проблемы, возникающей при работе с многоатомными борсодержащими молекулярными веществами для генерации ионных пучков, а именно: перекрытие экстракционного отверстия источника тугоплавкими продуктами фрагментации рабочего вещества. В результате перекрытия экстракционного отверстия нарушается однородность формируемого пучка, что неприемлемо для его дальнейшего использования для ионной имплантации в полупроводниковую подложку. На основании экспериментального исследования и анализа широкого спектра материалов, созданных на базе

карборана, сформулирован критерий отбора материалов и определены режимы работы источника, обеспечивающие очистку разрядной камеры и электродов формирующей оптики в течение разряда. По результатам работы оформлен патент РФ и США.

В пятой главе приведен достаточно широкий спектр экспериментальных работ и разработанных методик, используемых для решения фундаментальных и прикладных задач. Хотелось бы отметить разработку методики экспресс-анализа на радиационную стойкость конструкционных материалов для использования в атомных и термоядерных реакторах с использованием ионных источников, созданных автором. На пучках меди определена тормозная способность газов и углеродных фольг при взаимодействии с ними ионов меди с энергией 101 кэВ/нуклон.

В заключении представлены в обобщенном виде результаты работы и приведен список публикаций по теме диссертации.

Автором представлена к защите законченная работа, включающая в себя результаты многолетней работы по разработке и исследованию ионных источников на основе вакуумно-дугового и пеннинговского разрядов. В работе можно выделить три части, органически соединенных друг с другом. Первая часть посвящена усовершенствованию источника на основе вакуумно-дугового разряда, для которого предложены и реализованы два оригинальных метода повышения зарядового состояния генерируемых в вакуумной дуге ионов. Один из этих методов, а именно, инъекция высокоэнергетического электронного пучка в область разряда, успешно применен в источнике с пеннинговским разрядом, исследованию которого посвящена вторая часть диссертации. Конструкторское решение, предложенное автором, позволило реализовать данный метод в источнике с пеннинговским разрядом, используемом в имплантационных установках. Для этого же источника определены режимы, позволяющие генерировать в нем пучки многоатомных борсодержащих

молекулярных ионов для экстремально низкоэнергетической имплантации. В результате выполненных работ обеспечиваются условия высокоэффективной имплантации при энергии имплантации менее 300 эВ. Особо следует отметить оригинальную конструкцию канала транспортировки многоатомных борсодержащих молекулярных ионов, включающую электростатическую линзу с прямоугольными отверстиями и электростатический ондулятор с возможностью регулировки энергии имплантации. Следует отметить, что работы с источниками многоатомных борсодержащих молекулярных ионов для нужд полупроводниковой промышленности в нашей стране ведется только командой, руководимой автором диссертации.

В третьей части представлены результаты применения источников, разработанных автором для решения фундаментальных и прикладных работ. На базе установки ТИПр ведутся работы по определению тормозной способности газов и плазмы при взаимодействии с ионными пучками, ускоренными до энергии 100 кэВ/нуклон. Указанная область энергии ионов является пределом применимости классической теории торможения заряженных частиц в веществе. Развитие методов экспресс-анализа конструкционных материалов на радиационную стойкость с использованием пучков ионов позволяет заметно ускорить процесс разработки новых материалов для атомных и термоядерных реакторов. Для термоядерных реакторов это наиболее актуально, т.к. на сегодняшний день исследование материалов при радиационном воздействии до уровня 100 и более смещений на атом на существующих реакторах требует несколько лет. С использованием ионных пучков требуемое количество дефектов нарабатывается за несколько дней.

Замечания по работе:

1. Для источника с пеннинговским разрядом подробно представлено описание катода и антикатода с аксиальным отверстием, но не представлена

конструкция или форма отражательного электрода, располагаемого за антикатодом.

2. На мой взгляд, излишне много уделено внимания подробному описанию технике проведения эксперимента с фторсодержащим карбораном, хотя это и, безусловно, представляет интерес.

3. Важный и интересный раздел диссертации с проведением имитационных исследований по изучению радиационной стойкости реакторных материалов. Не отражено влияние температуры мишени, нагрев мишени при облучении, присутствует ли её термостатирование. Важным является при этом описание конструкции мишенных камер.


4. Имеются замечания к тексту диссертации. Часто по тексту используются упрощенные выражения или термины, например, «напряжение ускоряющее пучок», правильно: «напряжение, ускоряющее ионы пучка», (стр. 133); «... реального распределения магнитного поля», правильной – «распределения индукции магнитного поля» (стр. 136) и др. При описании конструкции источника MEVVA-M для соленоида на канале дрейфа используется то сокращение СКД (как, например, на рис. 1.21), то СДК (как, например, на рис. 1.22). В автореферате рис. 2а и рис. 3 имеют слишком мелкие подписи.

Указанные недостатки не влияют на высокую научную ценность диссертации, а совокупность представленных результатов исследований может быть квалифицирована как решение крупной научно-технической задачи, имеющей принципиальное значение для развития, прежде всего, технологий получения ионных пучков для ускорителей тяжелых ионов, полупроводниковой промышленности и ядерной энергетики.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации, содержит обоснованные выводы и рекомендации, отвечает требованиям ВАК РФ.

Диссертационная работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, **Кулевой Тимур Вячеславович**, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04. - «Физическая электроника».

Заведующий научно-производственной лабораторией
"Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных
технологий" Инженерной школы новых производственных
технологий Томского политехнического университета,
доктор технических наук, профессор



Ремнев Геннадий Ефимович

Адрес: 634000, Россия, г. Томск, проспект Ленина, д. 2 стр. 4,
Инженерной школы новых производственных технологий
Томского политехнического университета
Тел.: (3822) 606405
Факс.: (3822) 606405
E-mail: remnev@tpu.ru

Подпись Ремнева Г.Е. удостоверяю
Ученый секретарь
Томского политехнического университета



Ананьева О.А.