

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 ”,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Рецензируемая диссертационная работа Кулевого Тимура Вячеславовича посвящена одному из важнейших направлений физической электроники, а именно, методам генерирования потоков заряженных частиц, а также изучению физических основ плазменных и пучковых технологий. Развитие методов генерации пучков заряженных частиц с параметрами, обеспечивающими их успешное применение в высокоинтенсивных ускорителях тяжелых ионов, в полупроводниковой промышленности, а также в ядерной энергетике является важной научно-технической проблемой.

Интерес к использованию источников на основе вакуумно-дугового разряда определяется возможностью создания на их основе высокоинтенсивных инжекторов атомарных тяжелых ионов вплоть до урана для крупных ускорителей тяжелых ионов. Несмотря на заметный прогресс в развитии альтернативных источников, в частности, источников на электронно-циклотронном резонансе и различных модификаций источника ионов с электронным пучком, вакуумно-дуговой источник, как прежде, обеспечивает самые высокие интенсивности пучков тяжелых ионов. Вопрос повышения зарядового состояния ионов, генерируемых в вакуумной дуге без потери

интенсивности формируемого ионного пучка, является ключевым вопросом развития ионных источников данного типа.

Стремительное развитие микроэлектронных технологий в направлении уменьшения размеров элементов микросхем привело к тому, что на повестке дня стоит вопрос изготовления изделий с технологической нормой ниже 20 нм. Для этого необходимо обеспечить имплантацию в подложку ионов с экстремально низкой энергией (на уровне нескольких сотен электрон-вольт). При этом сохраняется необходимость базовых технологий, в которых используется имплантация ионов с высокой энергией (вплоть до нескольких МэВ). Сужение требуемого диапазона ускоряющих напряжений при сохранении широкого диапазона энергий внедренных атомов может быть достигнуто регулировкой массового состава и зарядового состояния эмитируемых плазмой ионов. Увеличить энергию внедряемых ионов позволяет повышение их зарядности, а снижение энергии внедренных атомарных частиц обеспечивается применением пучков многоатомных молекулярных ионов.

В связи с вышеизложенным, тематика диссертационной работы, направленная, с одной стороны, на повышение зарядового состояния ионов, генерируемых в вакуумно-дуговом и пеннинговском источниках, а с другой на развитие методов генерирования пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионов, является, несомненно, актуальной.

В представленной диссертационной работе отражена многолетняя успешная научная деятельность Т.В. Кулевого. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения с общим объемом 252 стр. Список использованных источников включает 276 наименований. К наиболее важным результатам представленной работы следует отнести:

– глубокий анализ современного состояния научных работ в области физики и техники источников на основе вакуумно-дугового и пеннинговского

разрядов, позволивший сформулировать актуальные вопросы развития данных источников;

– использование инжектируемого электронного пучка для повышения зарядового состояния в источниках с вакуумно-дуговым разрядом и пеннинговским разрядом, что продемонстрировало универсальность данной идеи, а также разработка оригинальных конструкторских решений, позволивших реализовать данную идею;

– детальное изучение ступенчатого вакуумно-дугового разряда с высоким продольным градиентом магнитного поля, что позволило увеличить как среднее значение зарядового состояния генерируемых в разряде ионов, так и максимально достижимые значения зарядовых состояний ионов;

– разработка режимов генерации в пеннинговском разряде пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионов, а также запатентованного метода непрерывной самоочистки разрядной камеры в результате использования специальных рабочих веществ, что обеспечивает выход на технологические нормы 20 нм и ниже;

– успешная реализация идей повышения зарядности ионов в пеннинговском разряде за счет инжекции высокоэнергетического электронного пучка и генерации в данном разряде многоатомных борсодержащих молекулярных ионов открывает возможность создания установки для ионной имплантации, обеспечивающей необходимое легирование полупроводниковых подложек во всем требуемом диапазоне энергий ионов;

– создание сети экспериментальных установок ионного облучения и имплантации на основе разработанных источников для проведения исследований в области фундаментальной физики и решения прикладных задач, особенно в области ядерной энергетики.

Научная новизна и достоверность результатов исследований, а также обоснованность сформулированных в диссертационной работе выводов,

заклучений и выносимых на защиту научных положений, не вызывают сомнения. Отличительными особенностями диссертационной работы является высокий научный уровень физических исследований и их направленность на достижение практически значимого результата для конкретных приложений. Это позволило автору получить ряд важных результатов фундаментального характера (предложены способы повышения зарядового состояния ионов в вакуумно-дуговом и пеннинговском разрядах, разработаны принципы получения пучков многоатомных борсодержащих молекулярных ионов, разработаны методики проведения экспериментов по экспресс-анализу радиационной стойкости конструкционных материалов и взаимодействию ионных пучков с плазменными и газовыми мишенями), а также создать экспериментальную базу для проведения широкого круга исследований.

Практическая ценность работы автора заключается в следующем:

– показана возможность существенного уменьшения габаритов тяжелоионных высокоинтенсивных ускорительных комплексов без потери интенсивности ионного пучка в результате повышения зарядового состояния ускоряемых ионов,

– показана возможность создания универсального источника для ионных имплантеров, используемых в полупроводниковой промышленности, применение которого обеспечит генерацию ионного пучка в широком диапазоне энергий и уменьшение общих габаритов установки

– разработаны и внедрены различные методики и экспериментальное оборудование для экспресс-анализа конструкционных материалов, разрабатываемых для ядерной и термоядерной энергетики.

Достигнутые результаты опубликованы соискателем в ведущих отечественных и зарубежных научных реферируемых журналах. Автор неоднократно представлял на обсуждение свои работы на Российских и Международных конференциях и симпозиумах, активно сотрудничал с

ведущими мировыми фирмами в области ионной имплантации. Все это позволяет утверждать, что выполненные им исследования соответствуют мировому уровню развития данной области физической электроники.

Тем не менее, к работе можно предъявить ряд замечаний:

1. Автором не проведено сравнение предложенного им метода повышения зарядового состояния ионов за счет инжекции электронного пучка в область вакуумно-дугового или пеннинговского разряда с методом, реализованным в ионном источнике с электронным пучком.

2. В работе не представлены результаты исследования влияния длительности электронного пучка на зарядовое состояние ионов в вакуумно-дуговом разряде, что представляет интерес для более глубокого понимания происходящих в разряде фундаментальных процессов.

3. Ряд графиков, на которых представлены результаты измерения масс-зарядового состава пучка, генерируемого источником типа Bernas, выполнен в очень мелком масштабе, что затрудняет их восприятие.

Указанные замечания не снижают общее хорошее впечатление о работе и не затрагивают выносимые на защиту научные положения диссертационной работы Т.В. Кулевого.

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 29 статьях в реферируемых журналах. На способ длительной непрерывной генерации пучка ионов карборана в условиях постоянной самоочистки электродов ионного источника и компонент системы экстракции ионного имплантера оформлены патенты Российской Федерации и Соединенных Штатов Америки.

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

Совокупность результатов исследований, представленных в диссертационной работе, может быть квалифицирована, как решение крупной научно-технической задачи, имеющей принципиальное значение для дальнейшего развития, прежде всего, полупроводниковой промышленности и ядерной энергетики, а также техники генерации высокоинтенсивных пучков тяжелых ионов.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, отвечает 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».

Официальный оппонент,
заведующий лабораторией пучков частиц ИЭФ УрО РАН
доктор технических наук,
член-корреспондент Российской академии наук

 Николай Васильевич Гаврилов

Подпись Н.В. Гаврилова заверяю:

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН

к.ф.-м.п.



 Е.Е. Кокорина

«18» «сентября» 2019 г.