

## 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 к по специальности 01.04.04 –  
«Физическая электроника».**

### **Актуальность темы.**

Актуальность избранной диссертантом темы высока. Она обусловлена необходимостью создания ионных источников для имплантации, которые способны работать в очень широком диапазоне параметров пучков, по выражению автора в «экстремальных режимах ионной имплантации». Подход, предложенный автором, основан на модификации режимов разряда в ионных источниках с вакуумно-дуговыми и пеннинговскими источниками плазмы при инъекции в газоразрядную плазму электронного пучка. В результате выполнения данной работы решена важная научно-техническая задача, состоящая в создании принципиально новых и существенном усовершенствовании известных источников ионов с параметрами и характеристиками, обеспечивающими возможность создания более компактных ускорителей пучков тяжелых ионов металлов, установок ионной имплантации, работающих в экстремальных режимах ионного воздействия: многозарядными ионами, многоатомными ионами непроводящих твердотельных веществ, интенсивными потоками ионов низких энергий и др.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.** Автором на достаточно высоком научном уровне используются различные подходы и методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций, изучаются и критически анализируются известные достижения и теоретические положения других авторов по ионным источникам для имплантации и источникам многозарядных ионов. Список использованной литературы содержит 276 наименований. Выводы и результаты, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны, так как опираются на результаты анализа обширного экспериментального материала и численное моделирование.

**Личный вклад** Т.В. Кулевого является определяющим, а основные результаты получены автором лично, что отражено в соответствующих публикациях.

**Научная и практическая ценность** работы состоит в том, что предложенные и исследованные в ней новые источники ионов можно использовать в полупроводниковой промышленности и ускорительных комплексах для фундаментальных исследований.

### **Оценка новизны и достоверности.**

Научная новизна работы состоит в создании ионных источников для имплантации с инжекцией электронного пучка, способных работать в широком диапазоне параметров разряда, с повышенной зарядностью полученных ионных пучков, а также обеспечивавших условия для генерации в плазме молекулярных ионов многоатомных борсодержащих соединений (декаборана, карборана и др.) и формирования интенсивного пучка многоатомных молекулярных ионов с высоким долевым содержанием бора с высокой плотностью тока ионного пучка.

Особенно интересно с практической точки зрения, что в диссертации рассматриваются не только подходы к проектированию и конструкции

ионных источников, с которыми успешно получены нужные результаты, но и результаты поисковых экспериментов, которые не увенчались успехом. Очень подробно обсуждаются важные детали экспериментов, что, к сожалению, встречается в подобного рода работах довольно редко. Это позволяет познакомиться с «кухней» экспериментальной работы, с методологией автора, часто довольно непривычной, но позволяющей успешно решать поставленные задачи. Автор предложил и экспериментально исследовал модификации существующих ионных источников с интеграцией в конструкцию источника электронного пучка, что позволило существенно улучшить параметры пучков и расширить их диапазон. Это, на мой взгляд, самый важный результат исследований диссертанта.

Совокупность полученных результатов, научных положений и выводов диссертационной работы, связанной с комплексным исследованием вакуумного дугового разряда, а также тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов, безусловно имеет новизну и представляет собой существенный вклад в развитие вакуумной и плазменной электроники.

Однако, несмотря на имеющиеся многочисленные достоинства работы, в ней обнаруживаются и отдельные недостатки, которые серьёзно не влияют на представленные выводы и результаты.

1. В тексте присутствует относительно небольшое количество опечаток и не совсем корректных формулировок. Так на стр. 32 утверждается, что «Скорость дрейфа ионов в плазме вакуумно-дугового разряда составляет, как известно, величину порядка  $10^{-6}$  м/с». Подпись к рис. 2.5, написано «с аксоальным отверстием». Обсуждается источник фирмы NISSAN (стр.108), далее в подписи к рис.3.5 название фирмы

меняется на NISSIN. Стр.123, написано «Для того чтобы» (без запятой). На подписи к рис.5.4 написано «мишеннаяк амера».

2. стр.44, где обсуждается заметное уменьшение тока ионного пучка в момент инжекции в плазму разряда электронного пучка делается утверждение, что это происходит из-за потерь плазмы на стенках канала в результате взаимодействия электронного пучка с плазмой. Это утверждение представляется недостаточно обоснованным. Возможно, наблюдаемый эффект связан с попаданием сопутствующего электронного пучка на ионный коллектор.

3. Не приводится обсуждение данных на графике на стр.46 (рис.1.19). Почему при инжекции пучка происходит резкое падение пика свинца +2, но практически не меняются амплитуда пиков свинца +3 и +6, а только появляется пик свинца+4, очень маленький по амплитуде. Казалось бы, полный ток всех заряженных фракций должен быть более-менее постоянным?

4. В тексте довольно часто встречается термин «ток намагничивания» в отношении обычного соленоида или катушки без сердечника (например стр.47). Правильно было-бы сказать «ток катушки или соленоида», поскольку намагничивающийся сердечник отсутствует.

5. На рис. 1.22, по-видимому из-за неудачно выбранного масштаба и недостаточных пояснений в тексте непонятно, что есть ток разряда, то ли большой амплитуды пик (луч А) вблизи вертикальной оси, то ли плавный сигнал малой амплитуды и большой длительности (скорее всего наводка). Вообще говоря, некоторое недоумение вызывает частая демонстрация в тексте диссертации сигналов с большими искажениями и шумами в результате наводок на измерительные цепи. Часто это вызывает затруднения в восприятии и интерпретации данных.

6. Непонятно, почему не измеряется весь спектр масс при определении процентного содержания компонент при анализе пучка ионов урана и нужно делать некие предположения (стр.57).

7. стр.59 утверждается, что «магнитное поле имеет заметную радиальную составляющую и в этой области реализуется разряд в скрещенных магнитном и электрическом полях». При обсуждении не приводится картина силовых линий магнитного поля и положение, и размеры электродов, поэтому непонятно, имеет ли место разряд в скрещенных полях в области дополнительных анодов.

8. стр.62. Делается утверждение о магнитном сжатии плазмы разряда в неоднородном магнитном поле. Плазма на этих временах должна свободно растекаться вдоль магнитного поля, анизотропия плазмы, наоборот, приводит к усилению потока вдоль поля.

9. Утверждение на стр.78, что в источнике Бернса однократный проход электронного пучка с током несколько десятков миллиампер не должен приводить к заметному увеличению зарядового состояния ионов сурьмы. Это не находится в противоречии с приводимыми в диссертации данными по существенному влиянию инжекции электронного пучка на зарядовые состояния в источниках с вакуумной дугой?

10. стр. 88. Делается утверждение, что «при мощности 104Вт в разряде при мощности электронного пучка 30Вт должно хватить для увеличения температуры электронов и, как следствие, к увеличению зарядового состояния генерируемых ионов». Непонятно, может ли этого хватить для наблюдаемого в эксперименте увеличения зарядового состояния. Для этого требуется численное моделирование, по крайней мере.

11. В Главе 2.4, посвященной моделированию условий в плазме разряда не учитываются эффекты плазменно-пучкового взаимодействия.

12. Ссылка [1] на стр.136 неправильная

13. Какие температуры ионов и электронов задавались при расчете формирования пучка (раздел 3.5.1? Как учитывалось наличие электронного пучка?

14. В тексте часто встречается «ионные пучки с энергией 101 кэВ» например стр.197, 202 и далее. Какой смысл имеет указывать значение энергии с такой точностью? Имеет ли это какое-то принципиальное значение?

Впрочем, отмеченные недостатки не снижают высокого качества исследования, они не влияют на главные результаты диссертации, описанные выше. Результаты довольно оригинальны, обладают научной новизной и практически значимы, демонстрируют вклад автора в физику и технику ионных источников. Это характеризует соискателя как сложившегося исследователя высокого уровня, умеющего ставить и комплексно решать сложные технические задачи.

Подводя общий итог, необходимо заключить, новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для российской науки и практики в области ионных источников, а сама диссертация является законченной научно-квалификационной работой, отвечающей паспорту 01.04.04 – «Физическая электроника».

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

Диссертационная работа 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

Заместитель директора по научной  
работе ИЯФ СОРАН  
им.Г.И.Будкера, доктор физ.-мат.  
наук, профессор

/А.А. Иванов/

Подпись официального оппонента  
заверяю

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН  
к.ф.-м.-н.



/А.С.Аракчеев/