

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

на диссертационную работу Бадарина Артема Александровича «Колебательные явления в релятивистских электронных потоках с виртуальным катодом в полях резонансных систем и фотонных кристаллов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 «Радиофизика» и 01.04.04 «Физическая электроника»

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Генерация излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов высокой и сверхвысокой мощности в настоящее время базируется исключительно на взаимодействии высокоэнергичного электронного потока с электромагнитным полем, возбуждающимся в различных электродинамических структурах. Одновременно, потребность в повышении частоты, мощности и КПД выходного излучения стимулирует изучение и разработку новых приборов и устройств для генерации СВЧ излучения. Диссертационная работа Бадарина Артема Александровича посвящена изучению колебательных явлений в релятивистских электронных потоках с виртуальным катодом при их взаимодействии с электромагнитными полями резонансных систем и фотонных кристаллов, а также анализу механизмов усиления положительной обратной связи в генераторах на базе ВК. Особенности генераторов на базе виртуального катода делают их перспективными источниками сверхмощного СВЧ излучения, а подобные исследования имеют существенное значение для развития мощной вакуумной СВЧ электроники. Электромагнитное излучение подобных мощных систем всегда характеризуется сложным спектральным составом, что требует применения современных нелинейных методов теории колебаний и волн для понимания процессов в пучках заряженных частиц с виртуальным катодом. В связи с этим диссертационное исследование Бадарина А.А. является

актуальным и соответствует паспортам специальностей 01.04.03 «Радиофизика» и 01.04.04 «Физическая электроника».

### **Достоверность и обоснованность научных положений и выводов сформулированных в диссертационной работе**

Достоверность и обоснованность полученных результатов, сформулированных положений и сделанных выводов обеспечивается адекватностью применённых моделей, корректностью исходных и упрощающих допущений, использованием уравнений, методов и подходов, активно используемых в качестве теоретической и методической базы ведущих отечественных и зарубежных учёных в области радиофизики и физической электроники, участием автора в научных проектах, поддержанных грантами РФФИ, РФФИ, Президента РФ и Минобрнауки, публикациями основных результатов и положений в авторитетных отечественных и зарубежных высокорейтинговых научных изданиях, многочисленными докладами на ведущих международных и всероссийских конференциях. Достоверность результатов подтверждается их соответствием современным физическим представлениям о процессах, происходящих в интенсивных пучково-плазменных системах, непротиворечивостью известным результатам. Ряд научных результатов, представленных в диссертационной работе, согласуется с известными теоретическими и экспериментальными данными.

### **Научная новизна полученных результатов**

В диссертационном исследовании были получены новые физические результаты в области радиофизики и физической электроники, полученные с применением современных методов теоретического исследования, а также предложены и изучены новые схемы генераторов на базе ВК, в частности:

- Предложена и исследована новая схема виркатора, в которой эллиптический резонатор используется в качестве пространства взаимодействия. Показано, что данный тип электродинамической



структуры позволяет увеличить эффективность энергообмена между электромагнитным полем и электронным потоком с ВК за счет лучшей локализации поля в области взаимодействия, а плавный переход резонатора в цилиндрический волновод способствует улучшению вывода электромагнитной энергии из системы.

- Предложена новая схема многолучевого релятивистского виркатора, и разработана её трехмерная самосогласованная электромагнитная модель, в которой несколько электронных потоков со сверхкритическими токами нагружены на общую электродинамическую структуру в виде отрезка цилиндрического волновода.
- Исследованы процессы взаимодействия между пучками в многолучевом релятивистском виркаторе с токами, превышающими критический ток для данной системы. Обнаружен эффект, заключающийся в подстройке частоты колебаний ВК в электронных потоках с меньшими токами к частоте колебаний ВК в электронном потоке с большим током, за счет связи через общее электромагнитное поле.
- Получено, что максимальный КПД (порядка 12 %) для предложенной автором схемы двухсекционного виркатора с ФК достигается при инжектируемом токе, лежащем в диапазоне между критическими токами для каждой из секций виркатора, а преодоление им величины критического тока для секции с ФК приводит к резкому падению КПД вследствие развития сжатого состояния.

### **Общие замечание по диссертационной работе**

Диссертационная работа Бадарина А.А. написана хорошим и понятным языком и является законченной научно-исследовательской работой, оставляющей положительное впечатление. Тем не менее, она не лишена недостатков:

1. В разделе 1.5 описана численная схема моделирования системы с виртуальным катодом в отсутствии внешних электродинамических

структур. Ряд свойств этой схемы требуют, по меньшей мере, развернутого комментария. Во-первых, неясно, почему в качестве области моделирования был выбран параллелепипед. В самом деле, на определенном удалении от электронного потока поля излучения будут представлять собой цилиндрические волны с различными азимутальными индексами. На первый взгляд кажется, что в цилиндрической геометрии области моделирования численные алгоритмы будут сходиться существенно лучше. Кроме того, для параллелепипеда возникает вопрос об использовании согласованных граничных условий (PML) на углах и гранях. Как реализованы эти особенности в численной схеме? Ставятся ли граничные условия для кулоновских полей пучка (PML, очевидно, неприменимо для кулоновских полей)?

2. В разделе 1.6 вызывает вопросы граничное условие, которое ставится на конце цилиндрической камеры дрейфа «с сеточным электродом на левой стороне и коаксиальным волноводным портом на правой». Каково условие в коаксиальном порту? Это условие излучения – но тогда в системе предполагается разложение по модам, для которых ставится такое условие? Или же там снова ставятся граничные условия типа PML?
3. Одним из результатов работы является обнаружение скачкообразных переключений частоты колебаний, генерируемых в системе с виртуальным катодом в зависимости от величины тока в системе, изображенные, в частности, на Рис.1.6 и Рис. 1.11. К сожалению, этот интересный эффект практически не обсуждается в тексте работы. В чем физические причины возникновения таких скачков? Чем определяются характерные значения тока, при которых происходят такие скачки?



4. В разделе 1.7 при анализе колебаний виркатора в эллипсоидальном резонаторе рассматриваются только аксиально-симметричные моды. Однако, как известно, из симметрии системы еще не следует отсутствие в ней несимметричных мод. Каково влияние несимметричных мод на динамику системы? Из текста неясно, были ли такие моды исключены из рассмотрения, или же, фактически, в рамках полной модели было показано, что они не возбуждаются в рассматриваемой системе?
5. В том же разделе на странице 48 представлены результаты расчета добротностей для ряда собственных аксиально-симметричных мод ТМ-типа используемого эллипсоидального резонатора. При этом не говорится о каком типе добротности идёт речь (нагруженной, дифракционной или общей), что не позволяет в полной мере оценить электродинамические характеристики резонатора.
6. Во второй главе диссертационной работы представлены результаты исследования многолучевых схем виркатора. Автор рассмотрел три схемы многолучевого виркатора, отличающиеся взаимным расположением электронных пучков и их количеством. Тем не менее, остаётся не до конца понятным, каким образом влияет расстояние между электронными потоками на процессы взаимодействия между колеблющимися виртуальными катодами. Существует ли предельное расстояние между пучками, при котором не наблюдается эффективного взаимодействия между виртуальными катодами, и чем оно определяется, если оно существует?
7. В отношении приведенного во второй главе анализа многолучевых схем виркатора, в частности, эффекта навязывания частоты более мощным пучком дополнительным пучкам, возникает вопрос: как соотносятся полученные результаты с хорошо известными разделами теории

колебаний (теория связанных осцилляторов)? В чем специфика рассмотренной в данной главе модели?

8. В третьей главе диссертационной работы предложена и исследована оригинальная модель двухсекционного виркатора на базе фотонного кристалла (ФК) с высоким КПД  $\sim 12\%$ , достигаемым за счет добавления механизма обратной связи. В то же время из представленного в данной главе материала сложно понять стартовые условия генерации в рассматриваемых схемах с ФК.
9. Еще одно замечание касается практической реализации виртуального катода в волноводах с ФК. Мне кажется, что для большей убедительности в работе должны были бы присутствовать оценки тепловых нагрузок и пробойных полей для достаточно тонких штырей, образующих ФК. В особенности это касается раздела 3.6, где на стр. 114 описан «устойчивый динамический режим, характеризующийся несколькими интенсивными ВК внутри ФК, а также вихревыми электронными структурами вследствие сильной турбулентности встречных потоков». Не приведут ли турбулентность электронного тока достаточно высокой плотности (указано значение 380 А) и мегаваттный уровень мощности излучения к быстрой деградации штырей ФК?
10. В работе присутствует ряд опечаток, неточностей и не вполне удачного выбора терминологии, в частности, на странице 16: «...индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus и включенных в перечень рецензируемых научных изданий [41–51,86], в которых **должен** быть опубликованы основные научные результаты диссертаций...», на стр.52 «одним из наиболее популярных резонаторов, используемых в приборах на базе ВК, **являются** цилиндрический резонатор», на стр. 65: «Одновременно, это приводит к **увеличение критического ток** из-за уменьшения сил пространственного заряда», на стр. 65: «**викаторов**»,



на стр. 82: «волна **непрерывно** отражается на **периодических** плоскостях фотонного кристалла», на стр. 88: «с **непрерывными** отражениями электромагнитной волны на **периодических** плоскостях фотонного кристалла», на стр. 125: «В заключении искренне выражаю глубокую признательность» и др.

Указанные замечания носят уточняющий характер и не ставят под сомнение общий высокий уровень диссертационной работы.

### **Соответствие диссертации критериям и требованиям ВАК РФ**

Автореферат диссертации и научные публикации в полной мере отражают её суть и содержание. Диссертационная работа является самостоятельным научным исследованием.

Достоверность результатов и личный вклад автора не вызывают сомнений. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 47 научных работах, включая 12 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, главу в коллективной монографии, 27 тезисов в трудах всероссийских и международных конференций, из них 12, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Исходя из вышесказанного, считаю, что диссертационная работа «Колебательные явления в релятивистских электронных потоках с виртуальным катодом в полях резонансных систем и фотонных кристаллов» удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Бадарин Артем Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по

специальностям 01.04.03 «Радиофизика» и 01.04.04 «Физическая электроника».

Кандидат физико-математических наук,  
Старший научный сотрудник отдела  
высокочастотной релятивистской электроники,  
ИПФ РАН.

Малкин А.М.

26 ноября 2020 г.

Адрес места работы: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова,  
46.;

тел.: +7 (910) 398-01-04

e-mail: malkin@ipfran.ru

Специальность по диссертации: 01.04.03 – радиофизика

Подпись к.ф.-м.н. Малкина Андрея Михайловича удостоверяю.



*Возвращен*  
*ИЩЕРЕН*  
*КАДРОВ* *ИПФ РАН*

*Андрей*

*Н.В. Антонова*