



Минобрнауки России  
Федеральное государственное  
бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики  
Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

Ульянова ул., 46, Бокс-120, Нижний Новгород,  
603950

Тел. (831) 436-62-02  
Факс (831) 416-06-16  
E-mail: dir@appl.sci-nnov.ru  
<http://www.ipfran.ru>

ОКПО 04683326, ОГРН 1025203020193,

## «УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»,

чл.-корр. РАН

Денисов Г.Г.  
«17» октября 2019



18.10.2019 № 330/3252

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## ОТЗЫВ

Ведущей организации Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» на диссертационную работу Анненкова В.В. «Электромагнитная эмиссия в тонкой пучково-плазменной системе», представленную в качестве диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — Физика плазмы

Диссертация Анненкова В.В. посвящена важнейшей проблеме физики плазмы — взаимодействию электронных пучков с плазмой. Несмотря на долгую историю исследований в этой области, которые восходят еще к классическим работам И. Ленгмюра, подробная и полная картина явления взаимодействия еще далека от завершения, в том числе из-за многообразия и сложности процессов, его сопровождающих. Помимо фундаментального значения исследование данного явления важно с точки зрения приложений, таких как нагрев плазмы в термоядерных установках, создания мощных источников излучения в труднодоступных областях электромагнитного спектра, моделирования астрофизических процессов и т. д.

Основной целью диссертационной работы является выявление механизмов генерации излучения при распространении электронного пучка в плазме, а также использование полученных результатов для интерпретации экспериментов и разработке источников мощного терагерцового излучения. Таким образом, тематику диссертационной работы Анненкова В.В. и исследуемые в ней задачи следует признать **актуальными** и важными.

**Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и их достоверность** подтверждаются, в частности, численным моделированием методом частиц в ячейках и экспериментами на установке ГОЛ-3, результаты которых соответствуют представленным положениям. В диссертационной работе исследован **новый** механизм генерации ЭМ излучения электронного пучка, распространяющимся в тонком плазменном канале. Представлена **новая** схема мощного терагерцового генерации излучения встречными пучками в плазме. Таким образом, **новизна** научных положений, выводов и рекомендаций несомненна. Предложенные в диссертационной работе объяснения экспериментальных результатов, а также плазменные схемы источников терагерцового излучения, подтверждают **теоретическую и практическую значимость** результатов диссертации. Следует, также отметить, что **личный вклад** Анненкова В.В. в результаты дис-

сертиационной работы был определяющим. В частности, им были разработаны оригинальные вычислительные программы, позволившие решить поставленные в диссертации задачи.

**В первой главе** построена простейшая одномерная аналитическая модель тонкой плазменно-пучковой системы, поперечный размер которой сравним с длиной волны генерируемого излучения. При этом предполагается, что плазма имеет продольную модуляцию плотности, что обеспечивает антенный механизм генерации излучения. Предсказания аналитической модели находятся в качественном согласии с результатами численного моделирования методом частиц в ячейках.

**В второй главе** с помощью численного моделирования плазменно-пучковое взаимодействие исследуется в более реалистичной конфигурации, предполагающей пучок достаточно длинным, а плазму изначально однородной. Предсказана генерация ЭМ излучения на второй гармонике плазменной частоты. Продемонстрировано, что продольная модуляция плазмы, необходимая для рассматриваемого механизма генерации ЭМ излучения, может образовываться самосогласованным образом в результате развития модуляционной неустойчивости.

**В третьей главе** полученные результаты используются для анализа экспериментов в открытой ловушке ГОЛ-3. Предложенный антенный механизм позволяет объяснить природу наблюдавшихся в эксперименте вспышек ЭМ излучения на второй гармонике плазменной частоты.

**В четвертой главе** представлена схема генерации мощного терагерцового излучения на основе механизма «плазменной антенны», предполагающее взаимодействие плазменных волн, возбуждаемых встречными электронными пучками.

Вышеизложенное составляет содержание четырех основных глав диссертации. Диссертационная работа также содержит Введение с кратким обзором литературы, с формулировками целей, актуальности и основного содержания работы. В Заключении сформулированы основные результаты. Диссертация правильно оформлена, имеет ясную и логически-обоснованную структуру. Тема диссертации полностью соответствует ее содержанию, которое соответствует области исследования «6. Заряженная плазма, пучки частиц в плазме, плазменная электроника» паспорта специальности ВАК России 01.04.08 — Физика плазмы. Текст автореферата правильно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Анненкова В.В. выглядит как добротное, достоверное и завершенное исследование, в котором исследованы особенности генерации ЭМ излучения в тонких плазменно-пучковых системах. Результаты диссертации хорошо обоснованы. Вместе с тем она не лишена и недостатков, которые можно сформулировать в виде **замечаний** и **комментариев**:

- 1) В численном моделировании для решения уравнений Максвелла использовалась схема FDTD с временным шагом (умноженном на скорость света) в 2 раза меньше, чем пространственный шаг. В данной численной схеме часть электромагнитных волн из-за численной дисперсии имеют фазовую скорость меньше, чем скорость моделируемого электронного сгустка (0.9 с), что может приводить к численному черенковскому излучению. Такое искусственное излучение, в свою очередь, может значительно исказить динамику плазменно-пучкового взаимодействия. Оценка влияния численного черенковского излучения на результаты моделирования в диссертации отсутствует.
- 2) В диссертационной работе расхождение между предсказаниями модели, предполагающей излучение вблизи области инжекции пучка, и экспериментом, где излучение на второй гармонике было замечено на расстоянии 84 см от точки инжекции, объясняется срывом неустойчивости из-за одновременного наличия в эксперименте продольного градиента плотности плазмы и мелко-масштабных флуктуаций плотности плазмы. Однако, как следует из рис. 3.12(г), даже с учетом этих факторов неустойчивость начинает развиваться после 10 см и способна развиться до значительного уровня задолго до достижения частицами пучка области излучения, наблюданной в эксперименте (около 80 см от точки инжекции).
- 3) В Главе 3 исследуются особенности излучения для случаев сильного и слабого магнитного поля. Из результатов численного моделирования следует, что излучение на второй гармонике более эффективно в случае сильного магнитного поля. Однако, даже качественного объяснения этого факта не приводится.

4) Глава 4 диссертационной работы посвящена источнику терагерцового излучения на основе встречных электронных пучков, распространяющихся в плазме. Важной характеристикой источника излучения является диаграмма направленности и, в частности, характерная ширина лепестков диаграммы. В работе такая диаграмма и оценка для ее ширины не приводятся, хотя говорится об «узконаправленном» ЭМ луче.

5) Работы автора по теме диссертации не выделены в отдельный список и находятся в общем списке литературы, при этом из текста сложно понять, как соотносятся между собой главы диссертации и статьи автора. В частности, Глава 1 вообще не содержит ссылок на работы автора, а ссылки на работы автора 101 и 102 впервые появляются только в Заключении. В связи с этим было бы уместным для каждой главы пояснить, в каких работах представлены основные результаты, полученные в ней.

6) Встречаются незначительные недочеты в оформлении диссертации. Так упоминание рисунка 3.6 в тесте предшествует упоминанию рисунка 3.5. Формулы (1.3) и (1.4) в Главе 1 и формулы (2.6) — (2.8) в Главе 2 зачем-то еще повторяются в Главе 3.

Отмеченные недостатки не умаляют достоинств диссертационной работы, оценивая которую в целом, следует отметить, что она выполнена на высоком научном уровне и демонстрирует важный вклад соискателя в разработку обсуждаемых проблем. Полученные Анненковым В.В. результаты опубликованы в статьях в рецензируемых журналах, докладывались на многих российских и международных конференциях, известны научной общественности. Диссертация Анненкова В.В. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований содержатся решения задач, имеющих существенное значение для развития отрасли знания, соответствующий специальности 01.04.08 - «физика плазмы». Таким образом, диссертационная работа полностью соответствует требованиям специальности 01.04.08 - «физика плазмы», удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к диссертациям, а соискатель достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - «физика плазмы».

Доклад Анненкова В.В., отражающей основные результаты диссертации, был заслушан на научном семинаре Отделения нелинейной динамики и оптики Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» 13 июня 2019 г. Работа получила положительную оценку участников семинара.

Отзыв составил:

Руководитель отдела 330  
Федерального государственного бюджетного  
научного учреждения «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук»  
доктор физико-математических наук  
по специальности 01.04.08 — физика плазмы

И. Ю. Костюков

тел. 8 8314164831  
e-mail: [kost@ipfran.ru](mailto:kost@ipfran.ru)

Отзыв утвержден на научном семинаре Отделения нелинейной динамики и оптики Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» 13 июня 2019 г.

Ученый секретарь Отделения нелинейной динамики и оптики  
Института прикладной физики РАН  
кандидат физико-математических наук

А. В. Коржиманов