

Отзыв официального оппонента  
на диссертацию Самцова Дениса Алексеевича  
«Исследование генерации потока терагерцового излучения мультимегаваттного  
уровня мощности при релаксации РЭП в замагниченном плазменном столбе»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по научной специальности 1.3.9 Физика плазмы

Диссертация Д. А. Самцова «Исследование генерации потока терагерцового излучения мультимегаваттного уровня мощности при релаксации РЭП в замагниченном плазменном столбе» представлена на 129 страницах, содержит 6 таблиц, 50 рисунков и список литературы из 86 наименований.

Основная часть диссертации включает введение, четыре раздела и заключение.

Выбор темы диссертационной работы обоснован во введении. Здесь же дан обзор состояния исследований по выбранному направлению, определены задачи работы, обозначены использованные методы.

Тема диссертационного научного исследования актуальна. С практических позиций, актуальность темы обязана имеющимся потребностям в разработке источников мощного электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот. Такие источники нужны в самых разных областях науки, включая спектроскопию, биологию, медицину, и, конечно же, саму физику плазмы (нагрев плазмы, ее диагностика). Потребность в подобных источниках имеется в таких сферах практической деятельности как разработка перспективных систем безопасности, систем высокоскоростной связи и радиовидения, средств дистанционного воздействия на электронику. Во многих из перечисленных случаев требуется максимальная мощность импульсов терагерцового излучения.

В научном аспекте актуальность диссертационного исследования обусловлена наличием открытых вопросов, касающихся того, какие физические механизмы могут быть наиболее эффективно использованы для генерирования терагерцового излучения. В силу положения терагерцового диапазона на шкале электромагнитных колебаний такими механизмами могут быть, с одной стороны, квантовые, а с другой – классические механизмы излучения электронных осцилляторов, применяемые, с одной стороны, в лазерной технике, а с другой – в вакуумной и плазменной электронике. Освоение терагерцового диапазона в настоящее время интенсивно ведется в рамках обоих подходов. Использование пучково-плазменных систем относится ко второму подходу. Плазма достаточной плотности с распространяющимся в ней сильноточным электронным пучком, как было обнаружено, может эффективно излучать терагерцовое излучение, обеспечивая за счет большой мощности пучка высокую энергетику излучения. Однако физическая картина процессов при таком излучении еще далеко не полна. Ее построение в последние годы интенсивно ведется, но всё еще требует большого объема и теоретических, и экспериментальных исследований.

Именно последними и занимался автор диссертации. Работа выполнена в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, где исследования в обозначенной области ведутся на передовом уровне, а для проведения соответствующих экспериментов имеется уникальная экспериментальная база в виде электрофизической установки ГОЛ-ПЭТ с современным диагностическим комплексом.

Итак, методы физического исследования, использованные в диссертации, экспериментальные. При этом значительная доля работы соискателя состояла в разработке средств для создания исследуемого физического объекта – плазменного столба с контролируемыми параметрами, пронизываемого релятивистским электронным пучком, а



также новых инструментов для диагностики плазмы, электронного пучка и генерируемого электромагнитного излучения в специфических условиях эксперимента.

В первом разделе диссертации описаны структура и функционирование экспериментальной установки ГОЛ-ПЭТ. Описан диагностический комплекс. Подробно описаны разработанные радиометрическая система для регистрации спектрального состава излучения, методика и контактный датчик для измерения параметров релятивистского электронного пучка. Во втором разделе изложены результаты экспериментов по формированию плазмы. Описаны характерные особенности системы высоковольтного разряда для формирования плазменного столба. В третьем разделе приведены результаты измерения распределения электронов пучка по pitch-углам с использованием контактного датчика, оценка длины релаксации пучка в плазме. В четвертом разделе описаны исследования генерации терагерцового излучения в пучково-плазменной системе, распространяющегося вдоль оси плазменного столба, и измерения характеристик этого излучения. Описаны измерения основных характеристик потока излучения: спектрального распределения плотности мощности, энергосодержания и пространственного распределения мощности. В заключении подведены итоги исследования, сделаны выводы, обозначены перспективы исследований.

По содержанию диссертационной работы можно заключить, что она соответствует следующим направлениям исследований, определенным в паспорте научной специальности 1.3.9. «Физика плазмы» (отрасль науки – физико-математические): 4. Диагностика плазмы; 5. Источники и генерация плазмы; 6. Заряженная плазма, пучки частиц в плазме, плазменная электроника (в части электронных пучков в плазме); 14. Электромагнитное излучение плазмы. При этом диссертационная работа захватывает и отрасль технических наук по названной научной специальности в части разработки новых методов и создания новых приборов для диагностики плазмы (паспортное направление 4), разработки и создания новых источников генерации плазмы (направление 5).

В числе важнейших научных результатов соискателем, обладающих новизной, отмечу следующие.

Впервые экспериментально установлены закономерности влияния на мощность и спектральный состав потока ТГц излучения, выходящего вдоль оси пучково-плазменной системы, со стороны распределения плотности по радиусу замагниченного плазменного столба и спада плотности плазмы на его торце. На мой взгляд, это важное экспериментальное наблюдение, которое дает подсказки к уточнению картины процесса генерации излучения, богатую пищу для теоретических интерпретаций и в значительной мере задает направление дальнейших экспериментальных поисков.

Впервые достигнута мощность  $8 \pm 2$  МВт и энергия 5–7 Дж в потоке терагерцового излучения при микросекундной длительности импульса. Данный научный результат важен с практической точки зрения, поскольку демонстрирует возможность и закладывает основу для дальнейших разработок источников мультимегаваттных терагерцовых импульсов.

Впервые выполнен комплекс экспериментальных измерений характеристик микросекундного сильноточного электронного пучка (поперечные скорости, распределение по энергии) в условиях, когда он при формировании подвергается сильной компрессии, а при последующем прохождении через плазму обеспечивает генерацию мегаваттного потока терагерцового излучения.

Обоснованность научных результатов, полученных соискателем, не вызывает сомнений. Во-первых, они не противоречат ранее полученным экспериментальным закономерностям и имеющимся на сегодняшний день теоретическим представлениям о



механизмах генерации терагерцового излучения в плазменно-пучковых системах. Во-вторых, соискателем при проведении экспериментальных измерений использованы диагностические средства, в основе действия которых лежат методы, проверенные в мощной импульсной электронике и высокочастотной электронике. Более того, соискатель приложил большие усилия к тому, чтобы в тонкостях адаптировать средства измерений к сложным экспериментальным условиям.

Соискателем создана оригинальная система приготовления плазмы, основанная на импульсном напуске газа, дающая возможность создавать плазменные столбы с различными пространственными (поперечными и продольными) профилями концентрации заряженных частиц и высокой воспроизводимостью от импульса к импульсу.

Сформирован диагностический комплекс для получения функций распределения частиц релятивистского пучка электронного пучка по поперечным скоростям (питч-углам) и по энергии. При этом соискателем разработаны методика и математическая модель для построения функции распределения электронов по питч-углам по сигналам с многоколлекторного датчика, и выполнен цикл таких измерений. Важно, что разработанная методика позволяет строить функцию распределения за одно срабатывание электронного ускорителя. Надо отметить, что известны и одноколлекторные перестраиваемые датчики, позволяющие с требуемой точностью получать функции распределения электронов релятивистских пучков по поперечным скоростям, но лишь по набору большого числа импульсов.

Имеющийся радиометрический комплекс установки ГОЛ-ПЭТ адаптирован соискателем для регистрации спектральных характеристик потока терагерцового излучения. При этом осуществлены сложные калибровки спектроизмерительной и калориметрической аппаратуры.

Диссертация обладает внутренним единством и, судя по характерному авторскому стилю, написана автором самостоятельно. Личный вклад соискателя в проведенные исследования, а также его вклад в написание научных статей, четко обозначен. Признаков неправомерных заимствований в тексте диссертации не обнаруживается.

Результаты диссертационной работы опубликованы в четырех рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе в таких известных журналах как Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Plasma Physics and Controlled Fusion, IEEE Transactions on Plasma Science. Таким образом, публикационные требования, предъявляемые к кандидатской диссертации, выполнены. Результаты работы представлены на трех научных конференциях, в числе которых пользующиеся авторитетом Звенигородская конференция по физике плазмы и IEEE International Conference on Plasma Science.

По материалу представленной диссертации имеются замечания.

Текст диссертации содержит значительное количество стилистических и других языковых погрешностей. Имеются нарушения правил построения предложений, несогласования и пропуски слов, опечатки. Ограничимся лишь несколькими примерами. На стр. 76 в строке 7 первого абзаца после слов «генерация ТГц» пропущено слово «излучения»; вслед за этим, после ненужного разрыва предложения, имеем «подходы решения» (вместо «подходы к решению»). На стр. 107 в списке сокращений и условных обозначений при расшифровке аббревиатуры «ЭЦР» исчезло слово «резонанс». На стр. 4 терагерцовый диапазон частот 0,1–10 ТГц ошибочно поставлен в соответствие с интервалом длин волн 3–0,3 мм (верно: 3–0,03 мм). На стр. 14 имеется опечатка в размерности физической величины плотности тока ( $\text{kA/cm}^3$  вместо правильного  $\text{kA/cm}^2$ ).



В диссертации имеются неточности физического характера, вольности в терминологии.

На стр. 83 утверждается, что «частота излучения определяется частотой верхне-гибридных колебаний плазмы, т.е. плотностью плазмы»; в действительности эта частота зависит и от магнитного поля.

Вызывают недоумение термины «вынужденные флуктуации» (стр. 9), «диод прямого действия» (стр. 65, очевидно, неудачное производное от «ускоритель прямого действия»), «ленточный диод» (стр. 15, 23; ленточным является не диод, а формируемый с его помощью электронный пучок, как верно указано в других местах диссертации).

Неправильным является использование термина «коллиматор» для отверстий, отнюдь не обеспечивающих выделения части пучка частиц в узком диапазоне направлений скорости (стр. 43, стр. 66).

Мало подходит к реализованной в работе физической ситуации термин «угловая расходимость» электронного пучка (стр. 12–14, 44, 95 и т. д.). Поскольку пучок замагничен, правильнее говорить об угле наклона электронных траекторий к магнитному полю (питч-угле), как это и сделано в других местах диссертации.

Для обозначения пространственной неоднородности концентрации частиц в плазменном столбе соискатель использует термины «модуляция», «модулированный» (стр. 14, 64, 104). Эти термины в электронике обычно обозначает придание некоторой величине периодических изменений во времени. В рассматриваемом случае уместнее говорить о вариациях. Это избавило бы от некоторой путаницы, возникающей из-за того, что слова о «модуляции» плотности плазмы соседствуют (стр. 104) с упоминанием модуляционной неустойчивости, лежащей, как надо понимать, в совсем ином диапазоне волновых чисел.

Везде в диссертации концентрация электронов (число частиц в единице объема) ошибочно названа плотностью.

На стр. 88 говорится про «угловой размер источника излучения, который полагался равным сечению торца плазменного столба», хотя эти физические величины имеют разную размерность.

Автор использует на свое усмотрение самые разные обозначения для диапазонов величин, грубых и приближенных равенств. Например, на стр. 35 одновременно с « $\sim 1$  мм» встречаем «около  $80 \pm 10$  мкВ/Дж» и «масштаба 20 мВт». Подобное не способствует строгости изложения.

Замечания по существу диссертационного исследования следующие.

Название диссертации предполагает исследование генерации электромагнитного излучения. При этом соискатель ученой степени кандидата физико-математических наук подходит к генерации скорее как к феномену, а не к физическому процессу. Хотя в диссертации имеются отсылки к известным теоретическим работам и сделан ряд собственных оценок, из всей этой совокупности сведений нелегко сложить цельную картину. Так, соискатель приходит к выводу (в случае однородной плазмы, стр. 83 диссертации), что «генерация ТГц излучения является результатом развития двухпоточковой (пучковой) неустойчивости, которая приводит к коллективной релаксации килоамперного РЭП при его прохождении в длинном плазменном столбе...». При этом на стр. 7 диссертации указано на то, что возникновение в системе плазма – электронный пучок пучковой (двухпоточковой) неустойчивости с образованием плазменных волн происходит в условиях черенковского резонанса. Однако в условиях описываемых экспериментов имеется достаточно сильное внешнее магнитное поле, в котором замагничены не только



электроны плазмы (как и отмечено в названии диссертации), но и электроны пучка. При этом энергия электронов в пучке (вблизи 0,5 МэВ) соответствует релятивистскому фактору  $\gamma \approx 2$ , а значит, циклотронная частота нерелятивистских плазменных электронов близка ко второй гармонике циклотронной частоты пучковых электронов. Это создает условия для эффективного циклотронного взаимодействия. Однако из материала диссертации трудно понять, каково соотношение ролей фундаментальных механизмов излучения – черенковского и магнитнотормозного (в известных разновидностях) в исследуемой системе. Кроме того, в диссертации практически не затрагивается вопрос о когерентности получаемого излучения. Трудно понять, каков масштаб когерентности, где место получаемого излучения в координатах «спонтанное – вынужденное».

Далее, в диссертационной работе сделано важное наблюдение: введением периодической радиальной неоднородности плазмы можно достичь многократного (до 30 раз) увеличения выхода излучения в области частот 0,2–0,3 ГГц. При этом соискатель утверждает, что тем самым экспериментально обнаружен новый механизм взаимодействия пучка с плазмой, при котором возможна накачка пучком непосредственно плазменных колебаний непосредственно в электромагнитной ветви. Как мне кажется, это утверждение нуждается в дополнительном обосновании, в том числе и по причинам, обозначенным в предыдущем замечании. В подобных случаях, когда имеется несколько предполагаемых механизмов излучения, обычно приводят соответствующие дисперсионные диаграммы электронно-волнового взаимодействия, однако соискатель этого не делает. Кроме того, нельзя исключить, что увеличение выхода излучения вызвано и другими причинами, например, уменьшением поглощения излучения при его продольном распространении в слоистой плазме. Подобных альтернативных объяснений наблюдаемому эффекту соискатель не предлагает. Вопрос о поглощении плазмой генерируемого излучения в диссертации затрагивается лишь вскользь.

В диссертационной работе установлено, что при наличии у плазмы резкой торцевой границы, обращенной к коллектору, возрастает эффективность вывода излучения. При этом говорится о трехкратном «повышении эффективности вывода... излучения в вакуум, и далее из вакуума в атмосферу». Физических объяснений этого эффекта, достаточно неожиданного (казалось бы, резкая неоднородность среды, напротив, должна приводить к отражениям волн) соискатель не приводит. При этом, если о причинах повышения эффективности выхода излучения из плазмы в вакуум можно делать обоснованные предположения, то за счет чего в данном случае может улучшиться выход излучения из вакуума в атмосферу, совсем непонятно.

Диссертация не содержит сведений о степени ионизации и зарядовом составе ионов плазмы в формируемых плазменных столбах.

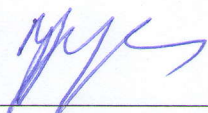
Перечисленные замечания не являются критическими, но лишь подтверждают сложность стоявшей перед соискателем научной задачи.

В целом, отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, поскольку восполняются весомыми научными и практическими результатами, полученными на ее выходе. Автор диссертации демонстрирует мастерство физика-экспериментатора, успешно решившего поставленные перед ним задачи. В диссертации представлено обширное, трудоемкое и результативное исследование по одному из актуальных вопросов современной физики плазмы, выполненное на высоком научно-техническом уровне. Изучив представленную диссертацию, официальный оппонент приходит к следующему заключению.



Диссертация Д. А. Самцова «Исследование генерации потока терагерцового излучения мультимегаваттного уровня мощности при релаксации РЭП в замагниченном плазменном столбе» представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи развития экспериментальных методов формирования и диагностики плотных плазменных столбов, микросекундных релятивистских электронных пучков и генерируемых при их взаимодействии импульсов терагерцового излучения, имеющей значение для развития физики плазмы, в том числе плазменной электроники. Диссертация соответствует критериям, установленным для кандидатских диссертаций в разделе 2 (п. 9 – п. 14) «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), а автор диссертации Самцов Денис Алексеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.9 Физика плазмы.

Официальный оппонент:

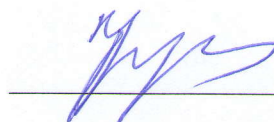


Пегель Игорь Валериевич,

доктор физико-математических наук (01.04.04 – физическая электроника),  
главный научный сотрудник отдела импульсной техники Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной  
электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

Почтовый адрес: 634055, гор. Томск, проспект Академический, дом 2/3  
Тел.: +7 (3822) 900-215. Адрес электронной почты: pegel@lfe.hcei.tsc.ru

Я, Пегель Игорь Валериевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Самцовым Денисом Алексеевичем, и их дальнейшую обработку.



И. В. Пегель

Подписи Пегеля Игоря Валериевича удостоверяю.

Ученый секретарь  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института сильноточной электроники  
Сибирского отделения  
Российской академии наук  
к.т.н



О. В. Крыгина

10 ноября 2023 г.