

ОТЗЫВ
официального оппонента
доктора физико-математических наук Кузнецова Алексея Алексеевича
на диссертацию ТИМОФЕЕВА Игоря Валериевича
«Генерация терагерцового излучения при коллективных взаимодействиях электронных и
лазерных пучков с плазмой»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.08 – физика плазмы
в диссертационный совет Д 003.016.03 на базе
ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Диссертационная работа И.В. Тимофеева посвящена теоретическому исследованию различных аспектов генерации высокочастотного (терагерцового / субтерагерцового) электромагнитного излучения в сильнонеравновесной плазме. Излучение в данной спектральной области представляет большой интерес для различных приложений – от использования в качестве диагностического инструмента до управления различными неравновесными процессами (в случае достаточно высокой интенсивности излучения). Известные методы генерации излучения, хорошо зарекомендовавшие себя на более высоких / низких частотах, не могут эффективно применяться в терагерцовом диапазоне. С другой стороны, перспективным источником терагерцового излучения представляется турбулентная плазма с достаточно высокой плотностью. Факт генерации импульсов высокочастотного излучения в плазме при прохождении через нее электронных пучков давно установлен. Однако практическое применение данного явления требует повышения количественных и качественных характеристик генерируемого излучения – т.е., необходимо обеспечить высокую интенсивность излучения (что подразумевает высокую эффективность трансформации энергии пучка в излучение); излучение должно иметь высокую направленность и узкую (и легко перестраиваемую) спектральную полосу. Обеспечение указанных характеристик и определение необходимых параметров установки требует детального понимания процессов генерации излучения. Кроме того, излучение турбулентной плазмы представляет интерес как средство диагностики параметров плазмы – например, в задачах управляемого термоядерного синтеза и в различных астрофизических приложениях; это также требует детального понимания связи между характеристиками излучения и процессами в плазме. Таким образом, работа И.В. Тимофеева безусловно является актуальной.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Во введении кратко представлено текущее состояние проблемы, определена цель диссертационной работы, представлены используемые подходы к решению поставленных задач, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается задача о вычислении инкремента колебаний в системе пучок-плазма. Представлен новый подход к численному решению соответствующего дисперсионного уравнения, что впервые позволило решить задачу о плазменной неустойчивости в наиболее общем виде (без предположений о малости инкремента и т.д.). Рассматриваются две модельные функции распределения электронного пучка – смещенное максвелловское распределение и смещенное степенное распределение. В результате для выбранных параметров (типичных для установки ГОЛ-3) вычислены ожидаемые значения инкремента и определены характеристики наиболее неустойчивых плазменных колебаний; исследована зависимость инкремента от параметров плазмы и пучка.

Во второй главе рассматривается задача о характеристиках спектра плазменной турбулентности, возбуждаемой электронным пучком. Приведены результаты кандидатской диссертации И.В. Тимофеева. Представлены результаты численного (PIC) двумерного моделирования эволюции системы пучок-плазма, для пучка с относительно низкой плотностью и распределением, близким к моноэнергетическому. Показано, что насыщение неустойчивости происходит из-за эффектов захвата пучка (как и в более ранних одномерных моделях); на фазе насыщения различные моды колебаний могут иметь сравнимые амплитуды за счет перекачки энергии между модами. Исследовано влияние магнитного поля на процессы генерации волн и релаксации пучка. Проанализированы характеристики колебаний в плазме, содержащей значительное количество релятивистских электронов со степенным распределением; впервые получены дисперсионные уравнения ленгмюровских и ионно-звуковых колебаний в такой плазме. Также проанализировано развитие модуляционной неустойчивости в плазме с указанным немаксвелловским распределением; показано, что основные характеристики этой неустойчивости качественно не отличаются от случая максвелловской плазмы.

В третьей главе исследуется генерация электромагнитного излучения в плазме за счет нелинейных процессов. Выведены формулы, описывающие соответствующие процессы; в отличие от существующих работ, учитывается конечное время жизни плазмонов. Проведено численное моделирование процесса генерации излучения на второй гармонике плазменной частоты за счет слияния плазменных (верхнегибридных) волн;

используется реалистичная модель спектрального распределения плазменных волн – анизотропных в области спектра, резонансной с пучком и изотропных в нерезонансной области. Вычисленная мощность излучения оказалась близкой к значениям, измеренным на установке ГОЛ-3. Исследована зависимость характеристик излучения (для данной модели спектра плазменных волн) от параметров плазмы. Проведено также моделирование процесса генерации излучения на первой гармонике плазменной частоты за счет рассеяния плазменных волн на локальных неоднородностях плотности, но непосредственное сравнение полученных результатов с экспериментом затруднено из-за проблем с выходом излучения из плазмы.

В четвертой главе рассматривается упомянутая выше задача – найти условия, при которых эффективность генерации терагерцового излучения в плазме повышается, а также излучение становится более узкополосным и направленным. Для излучения на первой гармонике плазменной частоты указанных целей предлагается достичь за счет использования линейной конверсии плазменных волн в электромагнитные на неоднородностях плотности плазмы. Для достаточно плавных градиентов плотности процесс конверсии исследуется аналитически (с использованием характеристик плазменных волн, найденных по методу, описанному в главе 1); найдена оптимальная ориентация градиента плотности по отношению к магнитному полю. Для более резких градиентов плотности проводится численное (PIC) моделирование системы пучок-плазма; показано, что коэффициент трансформации энергии максимальен, если период модуляции плотности плазмы равен длине волны пучковой моды. Развита теоретическая модель пучково-плазменной антенны, которая достаточно хорошо воспроизводит результаты PIC моделирования. Анализ этой модели позволил найти режим генерации излучения (основанный на так называемых «окнах прозрачности» для X-моды), позволяющий значительно увеличить толщину слоя генерирующей плазмы и, тем самым, повысить эффективность генерации; существование этого режима и высокая эффективность генерации терагерцового излучения (до 10%) подтверждены PIC моделированием.

Для излучения на второй гармонике плазменной частоты повышения эффективности генерации предлагается достичь за счет использования встречных электронных пучков; отличие от предыдущих работ на эту тему – в том, что рассматриваются мощные пучки с релятивистскими энергиями. Для системы с двумя пучками найдены характеристики возбуждаемых плазменных волн; найдены условия, наиболее благоприятные для нелинейного слияния этих волн. Высокая эффективность генерации терагерцового излучения в указанных условиях (до 5%) подтверждена PIC.

моделированием; излучение характеризуется достаточно высокой направленностью (поперек магнитного поля) и узкой спектральной полосой. Результаты данной главы открывают возможности для создания новых высокоэффективных генераторов терагерцового излучения.

В пятой главе предложен новый метод генерации терагерцового излучения – за счет взаимодействия волн, возбужденных в плазме встречными лазерными импульсами. Данный процесс исследован аналитически и с помощью PIC моделирования; найдены оптимальные параметры плазменных волн. Показано, что предложенная схема позволяет получать импульсы излучения рекордной мощности, с возможностью перестройки частоты излучения. Предложена схема перспективного генератора терагерцового излучения на основе описанного эффекта.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Представленные в диссертации результаты (сформулированные, в частности, в положениях, выносимых на защиту и отдельно в автореферате) отличаются научной новизной и представляют собой значительный шаг в развитии теории плазменной турбулентности. Научная и практическая значимость диссертации заключается в создании базы для дальнейших работ по усовершенствованию плазменных генераторов терагерцового излучения; предложены конкретные параметры и схемы таких установок, обеспечивающих максимальную эффективность. Полученные результаты также могут быть использованы в задачах диагностики турбулентной плазмы по ее излучению.

В целом, работа выполнена на высоком уровне. Тем не менее, представляется необходимым сделать следующие замечания:

1. В разделе 2.2 инкремент неустойчивости вычисляется с использованием упрощенного аналитического представления для тензора диэлектрической проницаемости. Однако при этом не используется метод, представленный в главе 1, который позволил бы определить параметры плазменных волн гораздо более точно (и, в частности, оценить применимость гидродинамического приближения).

2. Аналогично, результаты главы 1 не используются в разделе 2.4 при выводе дисперсионных уравнений в немаксвелловской плазме, хотя метод, представленный в главе 1 позволяет точно определить действительную и минимую части частоты колебаний; по крайней мере, сравнение с численными расчетами могло быть использовано для проверки точности полученных в разделе 2.4 аналитических формул.

3. В разделах 2.2 и 2.4 решаются качественно различные задачи и используются различные методы; т.е., непонятно, на каком основании эти разделы объединены в одну главу.

4. В разделе 3.2 не указаны параметры (характерные размеры и спектр) плазменных флуктуаций, использованных при расчете интенсивности излучения на первой гармонике плазменной частоты. Использовались ли при этом результаты исследования модуляционной неустойчивости, представленные в разделе 2.4?

5. В разделе 3.2 отдельные всплески излучения длительностью 2-10 нс (наблюдаемые на ГОЛ-3) связываются с коллапсом отдельных каверн. При этом, однако, не поясняется, каким образом коллапс каверн может повлиять на рассматриваемую генерацию излучения на второй гармонике плазменной частоты. Не могут ли процессы в кавернах вносить вклад также и в медленно меняющуюся компоненту излучения?

6. Процесс генерации излучения на второй гармонике плазменной частоты исследуется в разделе 4.3 с помощью PIC моделирования, в то время как в разделе 3.1 – на основе кинетического подхода. В чем причины и преимущества выбора различных методов исследования?

7. Несмотря на имеющиеся ссылки на наблюдения и теорию солнечных радиовсплесков метрового диапазона, в диссертации полностью проигнорировано явление, имеющее более близкое отношение к рассматриваемым задачам – субтерагерцовые (~ 0.1 - 1 ГГц) всплески в солнечных вспышках (см., например, Fleishman & Kontar, Astrophysical Journal Letters, 709, L127, 2010; Krucker et al., Astronomy & Astrophysics Review, 21, 58, 2013). Природа этих всплесков пока не установлена (предложено около десятка различных моделей), но генерация излучения в турбулентной плазме на первой или второй гармониках плазменной частоты рассматривается как возможный механизм. Таким образом, сравнение солнечных наблюдений с результатами лабораторного эксперимента и с развитой в диссертации теорией могло бы быть полезным для всех этих областей исследования.

Высказанные замечания не влияют на высокую оценку диссертации в целом. Тщательность проведения теоретических расчетов и численного моделирования, сопоставление их результатов с результатами экспериментов позволяют считать полученные результаты обоснованными и достоверными. Все основные результаты исследования были опубликованы в ведущих мировых журналах по физике плазмы. Личный вклад автора является определяющим. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Генерация терагерцового излучения при коллективных взаимодействиях электронных и лазерных пучков с плазмой» представляет собой законченное научное исследование и удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.04.08 – физика плазмы, а ее автор, Игорь Валериевич Тимофеев, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Доктор физико-математических наук
Заведующий лабораторией
радиоастрофизических исследований Солнца
ФГБУН ИСЗФ СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
тел.: +7 3952 564574
e_mail: a_kuzn@iszf.irk.ru

А.А. Кузнецов

Подпись А.А. Кузнецова заверяю
Ученый секретарь ИСЗФ СО РАН
Кандидат физико-математических наук
e_mail: isalakh@iszf.irk.ru



Дата:

И.И. Салахутдинова

10 августа 2018 г.