

В диссертационный совет  
Д720.001. 03 при ЛЯП  
Объединённого института ядерных исследований  
141980.г.Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертацию Алима Константиновича Каминского

«Мазер на свободных электронах с «обратным» ведущим магнитным полем и его использование для определения ресурса ускоряющих структур электрон-позитронных коллайдеров», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01-04-20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

В 80-х годах прошлого века интенсивно исследовались лазеры на свободных электронах (ЛСЭ). Интерес к этим мощным источникам электромагнитных волн сохранился до настоящего времени - создаётся «Европейский лазер на свободных электронах» в диапазоне нанометровых длин волн. Это источник уникальный, источники других типов не позволяют получить аналогичные параметры излучения. В диссертации исследуется мазер на свободных электронах (МСЭ) в диапазоне миллиметровых волн. В обоих источниках механизм излучения электромагнитных волн одинаков – электронный пучок излучает, двигаясь в вакууме по периодической криволинейной траектории, которая возникает при его движении в периодическом неоднородном магнитном поле. В СВЧ электронике для генерации мощного излучения на коротких длинах волн приходится либо использовать большое магнитное поле в циклотронных СВЧ приборах, либо использовать гофрировку волноводов с малым периодом в черенковских СВЧ приборах. Оба метода трудно реализуются уже в миллиметровом диапазоне длин волн. В лазерах и мазерах на свободных электронах, также как и в черенковских СВЧ приборах, нет необходимости создавать большие магнитные поля. Но в отличие от черенковских СВЧ приборов в лазерах и мазерах на свободных электронах длина волны излучения намного меньше периода неоднородности магнитного поля. Поэтому такой прибор легко изготавливается. Возможность генерации коротких длин волн при большой мощности излучения и объясняет актуальность темы диссертации. Новизна исследований изложенных в диссертации состоит в следующем. Впервые предложен новый тип МСЭ с «обратным» магнитным полем, этот тип МСЭ исследовался затем в зарубежных научных группах. Впервые в МСЭ применены брегговские зеркала, что позволило получить уникально узкие спектры излучения. Только реализации этих двух оригинальных предложений для улучшения параметров МСЭ достаточно для того, чтобы

признать новизну исследования несомненной. В диссертации много материала, который можно отнести к специальности физическая электроника. Но наиболее яркое достижение А.К.Каминского связано с анализом параметров электронного пучка, распространяющегося в неоднородном магнитном поле, и оно относится к специальности, по которой представлена диссертация – физика пучков заряженных частиц.

В первой главе приведено описание экспериментальной установки и диагностик параметров электронного пучка и СВЧ излучения. Обращается внимание на то обстоятельство, что ток пучка относительно невелик. Поэтому способ улучшения параметров пучка методом вырезания центральной части пучка при помощи диафрагмы в данной работе применить было нельзя. По этой причине разброс поперечных скоростей электронов оказался большим, и реализация МСЭ по традиционной схеме оказалась неудачной. Мощность излучения была мала и спектр излучения очень широк. Это заставило автора диссертации существенным образом изменить схему МСЭ. На этом моменте следует остановиться подробнее. Надо сказать, что в 80-е годы был бум исследований МСЭ и ЛСЭ, и во всех схемах направление ведущего магнитного поля совпадало с направлением скорости электронов. Таким образом, в данной работе уникальные параметры СВЧ излучения получены в первую очередь за счёт принципиального изменения схемы МСЭ, а не за счёт ряда мелких усовершенствований. Приоритет предложения А.К.Каминского признан в научном сообществе, и его схема затем исследовалась в других научных группах. В первой главе теоретически исследованы параметры электронов при их движении в ондуляторе. Показано, что в схеме «обратного» магнитного поля радиус электронного пучка при взаимодействии с электромагнитным полем почти не изменяется и поэтому не возникает потерь тока пучка из-за ухода электронов на стенку волновода. Это явление при традиционном включении ведущего магнитного существенно ограничивало достижение высокого значения эффективности МСЭ. Экспериментально показано, что переход к схеме «обратного» магнитного поля позволяет существенно увеличить мощность СВЧ излучения и сузить его спектр.

Во второй главе решается задача дальнейшего уменьшения ширины спектра излучения. В МСЭ возбуждается электромагнитная волна на частоте значительно превышающей критическую частоту волновода для генерируемой моды. При этом дисперсионная кривая волны пучка и кривая собственной моды волновода близки друг к другу в широкой полосе частот. Это приводит к тому, что полоса усиливаемых частот очень широка и при реализации генератора возбуждается несколько продольных мод. Этот процесс генерации нескольких продольных мод и наблюдался в главе 1 и ширина спектра была около 1%. Для создания СВЧ генератора с шириной спектра 0.1%, т.е. для генерации одной продольной моды, было предложено использовать селективные зеркала – цилиндрические брэгговские зеркала. Здесь надо отметить, что расчёт этих зеркал проводился учёными из ИПФ РАН. Подбор зеркал разной геометрии для данного эксперимента и

экспериментальная реализация СВЧ генератора с этими зеркалами была выполнена А.К.Каминским. Только третий вариант конструкции зеркал оказался удачным. Другая трудная экспериментальная задача, которую надо было решить, состояла в отладке гетеродинного метода измерения частоты в области 30 ГГц. Поэтому только высокая квалификация физика экспериментатора А.К.Каминского позволила успешно завершить этот совместный проект. Создан уникальный импульсный СВЧ источник с шириной спектра близкой к естественной ширине СВЧ импульса длительностью 200 нс. Частота излучения 30 ГГц, мощность излучения 20 – 25 МВт, частота повторения СВЧ импульсов 0.5 – 1 Гц

Обычно при защите диссертаций указывается, что научные результаты данной работы могут быть применены другими учёными в различных учреждениях. В конце этого отзыва делается аналогичное утверждение. Но в работах по релятивистской СВЧ электронике очень редко упоминается о том, что экспериментальное устройство, исследованное в диссертации, уже нашло применение. В главе 3 этой диссертации решается задача ускорительной техники при использовании МСЭ с «обратным» магнитным полем. Использование в течение несколько лет, разработанного автором СВЧ источника, полностью снимает все вопросы о достоверности основных результатов диссертации, полученных во 2 главе.

Возможности создания ускорителя с большим темпом ускорения ограничены процессом разрушения поверхности вакуумной камеры. Эти разрушения возникают из-за большого градиента температуры в поверхностном слое стенки вакуумной камеры при импульсном воздействии СВЧ излучения. Обнаружено, что степень разрушения зависит от числа СВЧ импульсов. В главе 3 решается задача определения стойкости материала стенки вакуумной камеры ускорителя при импульсном воздействии СВЧ излучения

Для её решения необходимо иметь СВЧ источник с параметрами, которыми обладает МСЭ описанный в главе 2: узкая полоса излучения - 0.1%, большая мощность – 20 МВт, высокая стабильность частоты излучения в течение  $10^5$  СВЧ импульсов. Узкая полоса излучения и высокая стабильность частоты излучения необходимы для эффективного ввода СВЧ излучения в резонатор, в котором исследовалось повреждение его стенок. Был создан специальный стенд, состоящий из резонатора, системы транспорта излучения из МСЭ в резонатор и МСЭ. При вводе излучения в резонатор неизбежно возникает отражение. Отражённая часть СВЧ мощности попадает на выход МСЭ и искажает его работу. Реализованная система транспорта позволила минимизировать влияние отражённого сигнала на МСЭ.

Важно, чтобы воздействие СВЧ излучения на стенку резонатора производилось только из-за нагрева. Поэтому надо было избежать СВЧ пробоя в резонаторе. Была налажена диагностика СВЧ излучения до и после резонатора.

Исследование стойкости материалов в ускоряющих структурах электрон-позитронных коллайдеров стало возможным благодаря высокой стабильности выходных параметров МСЭ и реализации тонких экспериментов по электродинамике волноводных структур. Исследования стойкости материалов при воздействии на них мощных периодических импульсов электромагнитного излучения проводились и других лабораториях. Использовалось лазерное и СВЧ излучение. А.К. Каминский провёл исследования в диапазоне параметров, существенно превышающих параметры, достигнутые на других СВЧ установках диапазона десятков ГГц, получены новые данные о динамике изменения параметров медных образцов в процессе их облучения мощными повторяющимися СВЧ импульсами.

Отметим, что к тексту диссертации имеются замечания. Наиболее существенное замечание состоит в следующем. При создании любого СВЧ излучателя экспериментально решаются две задачи. Первая состоит в формировании электронного пучка хорошего качества. Желательно иметь пучок, у которого все электроны имеют совершенно одинаковые характеристики. Такой пучок позволяет получить высокое значение к.п.д. и узкий спектр излучения. Эта проблема экспериментально и теоретически подробно изучается в главе 1. Вторая задача состоит в создании электродинамической системы для реального пучка, в которой спектр излучения будет узкий и энергия электронов пучка будет эффективно переходить в излучение. Эти вопросы главе 1 почти не обсуждаются. Не объясняется, как выбирался радиус волновода, нет рассуждений, о том какая поперечная мода будет возбуждаться, сколько продольных мод может возбуждаться. Коэффициент усиления для идеализированного пучка в расчёте в 10 раз отличается от коэффициента, измеренного в эксперименте. Поэтому нельзя утверждать, что и расчётная ширина полосы усиления имеет отношение к эксперименту. Приводятся экспериментальные спектры рис. 1.21, 1.23 и нигде не объясняется, почему именно эти частоты излучаются. На мой взгляд, была бы очень полезна диаграмма Бриллюэна, рассчитанная для условий эксперимента.

Ещё несколько замечаний. Утверждается, что на рис 1.25б " в области взаимодействия разброс поперечных скоростей в несколько раз превышает начальную величину." На мой взгляд, такого вывода из рис. 1.25 сделать нельзя.

Экспериментальный материал представлен небрежно. В первом экспериментальном спектре (глава 1) рис.1.10, измеренном сменой запредельных волноводов, нет экспериментальных точек. Не приводятся условия эксперимента. Нет объяснения, почему именно эта частота излучается. А читатель не может посчитать эту частоту по формуле, приведённой в главе 2 на стр.105, поскольку не приводятся условия эксперимента.

На рис 3.13 приведено два спектра и утверждается, что один спектр уже другого. При этом узкий спектр представлен в линейном масштабе, а

широкий спектр в логарифмическом. Поэтому сравнить их ширины невозможно.

На рис 2.21 и 3.3 в подписи к рисункам не объясняется, что отложено по осям графиков. К сожалению, можно привести и другие примеры.

Замечания, приведённые выше, относятся к качеству изложения материала. Оценивая диссертацию в целом, можно сказать следующее. Предложен и реализован новый способ формирования электронного пучка в МСЭ. Предложен и реализован новый тип электродинамической системы МСЭ с брегговскими зеркалами. В результате создан уникальный стабильный мощный СВЧ источник с чрезвычайно малой шириной спектра. Как правило, в экспериментальных работах по релятивистской СВЧ электронике не обсуждается воспроизводимость результатов. В данной работе стабильность СВЧ источника проверена в течение  $10^5$  СВЧ импульсов. Ещё раз повторю, что разработка МСЭ проводилась в условиях жёсткой конкуренции с зарубежными научными группами. А.А. Каминскому удалось предложить принципиально новую схему МСЭ и создать СВЧ источник, у которого нет аналога в мире. Параметры этого источника позволили успешно провести исследования по определению ресурса ускоряющих структур электрон-позитронных коллайдеров. Все эти достижения несомненно свидетельствует о высокой квалификации физика экспериментатора А.К.Каминского.

Результаты работы могут быть использованы в ФИ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ СОРАН, ИПФ РАН, ИЯФ СОРАН, НИИЯФ при ТПУ, МРТИ РАН, ВНИИЭФ, ВНИИЭФА и в исследованиях процессов воздействия СВЧ излучения на различные материалы. Новизна материала диссертации и достоверность утверждений, сформулированных в заключении диссертации, не вызывают сомнений. Автореферат правильно отражает содержание диссертации и опубликованных работ автора.

Диссертация А.К.Каминского удовлетворяет всем требованиям ВАК. Алим Константинович Каминский по уровню квалификации и по уровню его вклада в развитие физики пучков заряженных частиц и релятивистской СВЧ электроники несомненно заслуживает присвоения ему степени доктора физико-математических наук.

Доктор физ.- мат. наук

Зав. лабораторией ИОФ РАН

(119991, Москва, ул. Вавилова, 38)

Стрелков Павел Сергеевич



Тел.:(499) 135-63-87

e-mail: [strelkov@fpl.gpi.ru](mailto:strelkov@fpl.gpi.ru)



Подпись П.С.Стрелкова удостоверено

Учёный секретарь ИОФ РАН

« 7 » октября 2014 года



С.Н. Андреев