

В диссертационный совет
Д 720. 001.03 при ЛЯП
Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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

После успешных экспериментов на большом адронном коллайдере в области исследований по физике высоких энергий будет только расширяться класс задач, решение которых, несомненно, потребует дальнейшего развития ускорительной техники. Особый аспект эта проблема приобретает при создании линейных коллайдеров, где требуется большое количество СВЧ источников для накачки последовательности ускоряющих структур. При проектировании таких машин возникает вопрос о высоких градиентах ускорения, о предельных характеристиках структур с точки зрения пробивной прочности и ресурса, об эффективности большого количества СВЧ источников, обеспечивающих их накачку. Диссертация Каминского А. К. в конечном итоге посвящена именно этим вопросам, связанным с перспективами создания высокоградиентных линейных ускорителей. Отмеченное подтверждает соответствие диссертации специальности 01-04-20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Фундаментальный характер задач, являющихся мотивацией исследований диссертанта, позволяет утверждать об актуальности темы подготовленной им к защите научно-квалификационной работы.

Задачи, которые решались Каминским А. К., имеют комплексный характер, но есть объединяющее их начало, в достаточной степени выраженное в названии диссертационной работы. В основе выполненных исследований лежит идея диссертанта о новой разновидности мазера на свободных электронах (МСЭ) диапазона частот ~ 30 ГГц с обратным ведущим магнитным полем. Для доказательства преимуществ такой схемы было проведено детальное сравнение характеристик с предшествующими традиционными МСЭ мультимегаваттного уровня. Изучены генераторный и усилительный режимы нового прибора, в том числе, - с достаточно высокой эффективностью и узкой спектральной полосой, составляющей около десятка мегагерц. Последнее достигнуто за счёт применения селективных брэгговских резонаторов. Показано, что узкополосный МСЭ-генератор представляет эффективный инструмент для исследования ресурсных характеристик резонаторов, и получены надёжные

экспериментальные данные о характере и динамике нарастания изменений металлической поверхности в условиях быстрого нагрева скин-слоя ВЧ полями. Перечисленный комплекс работ отличался несомненной новизной полученных результатов, которые в значительной степени были ориентированы на подготовку проекта колайдера CLIC в ЦЕРН. Следует отметить, что исследования Каминского А. К. подразумевали большую инженерно-физическую составляющую, связанную с созданием, испытанием и эксплуатацией экспериментального стенда на основе индукционного ускорителя ЛИУ-3000 и диагностической аппаратуры.

Ознакомление с диссертацией позволяет утверждать, что сформулированные Каминским А. К. положения, выносимые на защиту, раскрыты и обоснованы в главах работы. Ниже, по ходу анализа их основного содержания, оппонент выделяет наиболее значимые на его взгляд результаты диссертанта.

В первой главе рассматриваются вопросы, связанные с обоснованием подходов, которые привели к созданию экспериментальной техники и позволили провести исследование МСЭ с «обратным» ведущим магнитным полем. Раздел 1.1 посвящён постановке задач исследований мощных микроволновых источников, которые обладали бы значительно лучшими спектральными характеристиками, чем «традиционные» схемы МСЭ. Для этого требуется пониженная чувствительность к скоростному разбросу в электронном пучке. Обосновывается необходимость привязки характеристик излучения (частота, ширина спектра, длительность и мощность импульса излучения) к проектным на тот момент параметрам накачки ускоряющих резонаторов колайдера CLIC. Естественным этапом в развитии работ явились шаги, направленные на изучение ключевых характеристик пучка ускорителя ЛИУ-3000 в области формирования, транспортировки и в пространстве электронно-волнового взаимодействия МСЭ. Эти результаты представлены в разделе 1.2 и показывают системный подход диссертанта в организации сложного экспериментального исследования. После описания в разделе 1.3 результатов экспериментов и особенностей функционирования традиционного МСЭ, где спектр излучения весьма далёк от узкополосного (~25%), приводится обоснование новой концепции МСЭ генератора с обратным магнитным полем (Раздел 1.4), призванной решить вопрос снижения полосы частот излучения при мультимегаваттном уровне мощности. Здесь важно то, что анализ дан с учётом реальных параметров пучка ускорителя ЛИУ-3000, качество которого вполне определённое, и оно не могло существенно варьироваться экстенсивными методами, типа коллимации периферийной фракции электронов. Идея новой схемы МСЭ базируется на смене направления ведущего магнитного поля по отношению к полю вигглера и имеет вполне понятную, но, в то же время, оригинальную математическую интерпретацию, вытекающую из анализа свойств решений уравнения для продольной скорости электронов. Развитый подход подтверждён в экспериментах с МСЭ генератором с «обратным» ведущим

магнитным, где получена ширина спектра в 20-25 раз более узкая, чем в традиционной схеме генератора. При реализации усилительного варианта МСЭ с «обратным» полем также были получены важные результаты. Например, профилирование поля вигглера позволило на частоте 36,4 ГГц достичь мощности (20-25) МВт, что в разы больше, чем в случае без профилирования. В завершение Главы 1, в разделе 1.5 приведено достаточно много данных численного моделирования режимов энергообмена идеализированных и «шумящих» электронных потоков в МСЭ-схемах: обычной и с «обратным» полем. Для последнего случая показано, что при малых величинах начального разброса скоростей частиц эффективность МСЭ может достигать 25%.

Во второй главе представлены исследования по созданию варианта МСЭ-источника с параметрами излучения, приемлемыми для испытаний ускоряющих структур. Это узкий спектр, стабильность частоты, мощности и к.п.д., определяющий энергетику импульса, достаточную для накачки резонатора. Диссертант описывает подход, согласно которому возможно некоторое масштабирование параметров, когда могут быть снижены требования на выходную мощность СВЧ источника. Однако требования прецизионного согласования частот МСЭ и накачиваемой структуры, а также ограничения на ширину спектра МСЭ остаются очень критичными. Специальное внимание в разделе 2.2 уделяется свойствам брэгговских резонаторов различного типа, которые призваны обеспечить селективное возбуждение колебаний в МСЭ-генераторе, невзирая на разброс параметров пучка ускорителя. Приведены обоснование преимуществ и подходы к оптимизации характеристик несимметричных брэгговских резонаторов со скачком фазы гофрировки. В схеме МСЭ с таким резонатором получены уникальные характеристики: узкий спектр $< 0,5 \times 10^{-3}$, нестабильность частоты такого же уровня и выходная мощность ~ 20 МВт. Тем не менее, в холодных электродинамических измерениях и в экспериментах весьма подробно проанализированы два других варианта резонаторов. Например, работа МСЭ с двухзеркальным брэгговским резонатором сравнивалась в режимах работы с «прямым» и «обратным» магнитным полем, и показано очевидное преимущество последней (предложенной диссертантом) схемы: демонстрируется типично трёхкратное увеличение мощности до ~ 25 МВт и кпд до $\sim 17.5\%$. Достаточно большое внимание уделено результатам численного моделирования систем с брэгговскими резонаторами, где, в частности, обоснован режим стартовой моды, как способ увеличения эффективности МСЭ. Кроме того, изучен эффект «расщепления рабочей моды», который приводит к уширению спектра генератора. Данные численного моделирования широко использовались для оптимизации экспериментальных схем, подготовки реальных экспериментов, или для интерпретации результатов измерений. Этим существенно повышается степень верификации результатов всего комплекса исследований.

Глава 3. С интересом читаются разделы диссертации, посвященные экспериментальным исследованиям ресурсных характеристик макета ускоряющего

резонатора с применением узкополосного излучения МСЭ-генератора. Особенности проблемы импульсного нагрева ускоряющей структуры коллайдера весьма подробно анализируются в первых двух разделах главы. Здесь приводятся особенности альтернативных методик и результаты исследований с использованием СВЧ, лазерного и ультразвукового воздействия на поверхность структур. В Разделе 3.3 большое внимание уделено постановке эксперимента по импульсному нагреву образцов до температур в сотни градусов в условиях ограниченного энергозапаса СВЧ импульса МСЭ. Особенность заключалась в том, что при накачке высокодобротной резонансной нагрузки импульсным излучением МСЭ на начальной стадии прихода СВЧ-импульса в нагрузку возникает практически полное его отражение. Такое отражение может отрицательно сказываться на работе автогенератора, вплоть до срыва генерации. В результате проведённого численного моделирования режима генерации в условиях меняющегося во времени согласования с нагрузкой было показано, что эффективная работа МСЭ на высокодобротную резонансную нагрузку возможна при достаточно точном согласовании частот. Экспериментальный стенд на основе МСЭ для испытания резонаторов описан в Разделе 3.4. Здесь значительное внимание диссертант уделил разработке и реализации методик устранения режима расщепления рабочей моды МСЭ, а также подавления паразитных пробоев в сложном квазиоптическом тракте, по которому СВЧ излучение доставляется от МСЭ-генератора до тестового резонатора. Особо хотелось бы выделить применение оригинального способа снижения вероятности пробоя на выходном вакуумном окне мощного СВЧ источника и формирования безопасной области для сброса отработавшего пучка за счёт модификации поперечного распределения полей СВЧ волны на основе эффекта Тальбота. Эффективным оказался подход сравнения параметров падающего и прошедшего излучения для мониторинга возникновения пробоев тестового резонатора в процессе длительных циклов включений МСЭ при испытаниях. Важно, что в процессе исследований созданный стенд и МСЭ-генератор, в частности, показал надёжную, устойчивую работу и возможность оперативной коррекции параметров. Раздел 3.5 систематизирует результаты испытаний тестового резонатора из бескислородной меди. Приведённый экспериментальный материал доказательно проиллюстрирован. В результате проведённых на МСЭ экспериментов диссертантом сделан практически важный вывод о том, что число облучающих СВЧ-импульсов, соответствующих началу повреждения и началу разрушения металла, отличается более, чем в четыре раза. То есть, предложена концепция, представляющая альтернативу ранее устоявшейся модели, согласно которой после появления первых признаков повреждения разрушение металла должно развиваться лавинообразно.

Отметим, что изложение материала в каждой главе диссертации завершается выводами, которые чётко сформулированы.

Автореферат включает необходимые сведения о диссертации Каминского А. К. и соответствует её содержанию. Сама диссертационная работа структурирована по правилам ВАК, содержит требуемые формальные разделы, в достаточной степени иллюстрирована и дает полное представление о проведенных исследованиях и их результатах. Достоверность полученных результатов обоснована результатами расчётов, численного моделирования и экспериментов, проводившихся в тестовых и эксплуатационных режимах МСЭ. Следует отметить, что личный вклад автора диссертации в проделанную работу не вызывает сомнения.

Как это типично для любой серьёзной научно-квалификационной работы, по диссертации Каминского А. К. можно сделать некоторые замечания.

1. Наилучшие параметры по ширине спектра были получены для генераторных схем МСЭ. В этом аспекте имело бы смысл дать прогноз применения для накачки ускоряющих структур усилительных вариантов.
2. В начале второй главы, в разделе 2.1 (Постановка задачи) вводится понятие некоторого «коммутатора», который давал бы разрешение на срабатывание генератора только на частоте, определяемой параметрами коммутатора. В дальнейшем становится понятным, что речь, на самом деле, идёт об узкополосных селективных брэгговских резонаторах (со ссылкой на работу [48]) взамен широкополосных отражателей в виде диафрагм с отверстиями. В этой связи представляется, что рассуждения о «коммутаторе», селективно включающем обратную связь генератора, только вносят сумятицу.
3. Показанная на рис. 3.9 фотография электрического пробоя внутри тестового резонатора мало информативна в том смысле, что в дальнейшем по тексту (стр. 190) анализируется некоторое пространственное смещение области пробоя: «оба зарегистрированных пробоя оказались на существенно отличающихся азимутах, хотя точка пробоев на рис.3.9 не менялась». С учётом отсутствия привязки фотографии на рис. 3.9 к геометрии резонатора, понять, что это за неизменная «точка пробоев», не представляется возможным.
4. В третьей главе не поясняется, каким образом в экспериментах с точностью не хуже 50° контролировался достигаемый нагрев участка медного кольца в тестовом резонаторе. Во всяком случае, на стр. 191 в комментарии к рис.3.27 говорится лишь о «расчетном распределении температуры».
5. Следует отметить ряд «формальных» недочётов. На странице 77 написано: «время включения магнетрона выбиралось таким, чтобы окончание его импульса соответствовало началу импульса тока пучка (рис.1.18.)». Данное утверждение следует понимать как опечатку, поскольку иначе усилительного режима не получить! Да и автор противоречит сам

себе, т.к. на рис.1.18 импульс магнетрона и электронного пучка существенно перекрываются по времени.

Также замечены следующие опечатки. В заголовке на стр.114 имеет место сбой порядковой нумерации. На стр. 49 имеется путаница в единицах измерения ускоряющего напряжения и энергии пучка. На стр. 127 опечатка: «эффективность МСЭ (15-20) МВт».

Можно отметить еще некоторые «небрежности» работы. Ссылки на литературу приведены в произвольном формате. В информации об авторских публикациях в автореферате и диссертационной работе упоминается 43 публикации, в то время как в автореферате показана только 41 работа. Качество отдельных рисунков, например рис. 1.9, оставляет желать лучшего. На рис.1.10 не приведено расшифровки единиц измерений в формуле, указанной по вертикальной оси. То же относится к некоторым обозначениям в формулах на стр.61. Кроме этого, в вводной части диссертации описание содержания глав могло бы быть конспективным, поскольку ниже эти главы присутствуют в полном объёме.

Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе Каминского А. К. Оппонент полагает, что ответы на заданные вопросы не составят для него проблемы и дадут специализированному совету Д 720. 001.03 дополнительные основания для позитивной оценки диссертационной работы. Здесь уместно заметить, что представленные материалы исследований имеют хороший уровень верификации и апробации. Труды Каминского А. К. представлены в рецензируемых научных журналах, трудах конференций и других изданиях (43 публикации). В базе WEB of Science значится 35 публикаций. Важно, что публикации и доклады равномерно распределены по годам, то есть, не несут признаков «предзащитного вброса». Все эти труды раскрывают тему диссертации, известны и ценятся специалистами, так как соответствуют этапам и уровню актуальных работ в области СВЧ электроники больших мощностей и ускорительной техники. Не вызывает сомнения, что полученные Каминским А. К. результаты будут востребованы научным сообществом для дальнейших применений в национальных и мировых исследовательских центрах.

Таким образом, Каминский Алим Константинович представил к защите законченную научно-исследовательскую квалификационную работу, систематизирующую приоритетные и оригинальные результаты цикла работ по решению актуальных научно-технических задач большой значимости по развиваемому научному направлению. На основании изложенного можно заключить, что диссертационная работа «Мазер на свободных электронах с «обратным» ведущим магнитным полем и его использование для исследования ресурса ускоряющих структур коллайдеров» удовлетворяет требованиям, предъявляемым в Положении ВАК к докторским диссертациям. Её автор, Каминский Алим Константинович, несомненно, заслуживает присвоения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01-04-20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника за решение важной научно-технической проблемы – исследование и

создание высокоэффективного лазера на свободных электронах диапазона миллиметровых волн с уникальными характеристиками и его применение в анализе ресурса ускоряющих структур, необходимых для высокоградиентных коллайдеров.

Главный научный сотрудник
Института электрофизики УрО РАН
доктор технических наук, профессор
член-корреспондент РАН



М. И. Яландин

Подпись члена-корреспондента РАН Яландина М.И. заверяю
Ученый секретарь Института электрофизики УрО РАН
кандидат физико-математических наук



Е. Е. Кокорина

Яландин Михаил Иванович
620016 г. Екатеринбург ул. Амундсена д.106
Институт электрофизики УрО РАН
Тел. +7-343-2678785
e-mail: yalandin@iep.uran.ru