

ОТЗЫВ

официального оппонента

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

Несмотря на колебания научной моды, в работах по созданию следующего поколения линейных электрон-позитронных коллайдеров ТэВ-ного диапазона энергий в течение ряда лет остаются актуальными высокочастотные диапазоны СВЧ источников: от 12 и 30 ГГц (CLIC, ЦЕРН, Европа) до 90 ГГц (SLAC, Стэнфорд, США). Согласно теории и результатам экспериментов, при сокращении длительности СВЧ импульсов переход к таким частотам позволяет значительно увеличить ускоряющие поля в структурах, не превышая пробойных поверхностных полей и пороговых тепловых нагрузок. С ростом частоты эффективность традиционно используемых в ускорителях СВЧ источников - клистронов с прямолинейными траекториями частиц - быстро снижается и поэтому разработка и создание мощных, высокоэффективных источников в миллиметровом диапазоне длин волн является чрезвычайно актуальной задачей для ускорительных приложений. Одновременно эта же задача важна для развития самой СВЧ электроники больших мощностей и целого ряда ее возможных приложений в других областях. Таким образом, диссертационная работа А.К. Каминского, посвященная созданию мощных мазеров на свободных электронах (МСЭ) миллиметрового диапазона и исследованию возможности их использования в ускорителях, выполнена по **актуальной тематике**.

Работы по созданию мощных коротковолновых МСЭ для ускорительных приложений были инициированы в ОИЯИ около 30 лет назад, и именно тогда А.К. Каминский начал исследования по этой тематике. За это время А.К. Каминским и его группой был выполнен целый ряд пионерских работ по разработке и экспериментальному исследованию МСЭ на основе магнитоуправляемых релятивистских электронных пучков, результаты которых признаны мировым научным сообществом. Прежде всего, это касается открытого ими эффекта «обратного» ведущего поля. Последовательное изучение и использование этого эффекта позволило А.К. Каминскому и его соавторам получить рекордные для миллиметрового диапазона параметры излучения. В последние годы в сотрудничестве с ИПФ РАН (Н. Новгород) под руководством и при непосредственном участии

А.К.Каминского создан МСЭ-генератор с оригинальным брэгговским резонатором, который является одним из наиболее долго и стабильно работающих мощных микроволновых генераторов данного класса. Этот генератор используется в ряде физических и инженерных приложений, включая исследования теплового ресурса ускоряющих структур суперколлайдеров нового поколения, что демонстрирует несомненную **практическую ценность** диссертации. Результаты диссертации могут быть также использованы для разработки различных сверхмощных когерентных источников миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

Материал диссертации изложен во *Введении*, *трех главах* и *Заключении*.

Во *Введении* обсуждается история вопроса, обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и кратко изложено основное содержание диссертации.

Первая глава посвящена электронно-оптическим экспериментам по формированию в линейном индукционном ускорителе ЛИУ-3000 релятивистского электронного пучка (РЭП) с высокой плотностью тока и минимизации разброса его параметров с целью использования в МСЭ миллиметрового диапазона длин волн. Здесь же сформулированы требования на параметры СВЧ-источника, ориентированного на два важных ускорительных приложения: запитку и тестирование высокоградиентных ускоряющих структур. Проведено детальное сравнение различных режимов работы МСЭ с винтовым ондулятором и ведущим однородным магнитным полем. Диссертантом впервые была экспериментально исследована новая разновидность МСЭ, в которой однородное магнитное поле ориентировано таким образом, что возможное направление вращения электронов в нем противоположно направлению вращения электронов в винтовом ондуляторе. Такая конфигурация названа автором МСЭ с «обратным» ведущим полем, и этот термин впоследствии стал широко использоваться в литературе. Обоснование новой схемы дано в диссертации на основе анализа дисперсионного уравнения для МСЭ. Теоретически и экспериментально продемонстрированы преимущества режима «обратного» ведущего поля перед традиционными схемами МСЭ с прямым направлением магнитного поля, в которых используется циклотронный резонанс для частиц, колеблющихся в ондуляторе.

Во *второй главе* ставится ключевая для приложений задача значительного уменьшения ширины спектра выходного излучения МСЭ. Для этой цели исследована возможность использования в развиваемой разновидности МСЭ волноводных резонаторов брэгговского типа. В частности, исследованы условия установления одномодовых и многомодовых режимов генерации в брэгговских резонаторах различных типов. Показано, что в генераторах на основе традиционной двухзеркальной схемы брэгговского резонатора, использованной в предшествующих экспериментальных вариантах МСЭ, а также мазера на циклотронном авторезонансе (МЦАР), при оптимальных параметрах одномодовый режим генерации устанавливается на нелинейной стадии в результате конкуренции большого числа

продольных мод резонатора, расположенных внутри полосы брэгговского отражения. В условиях неустойчивости напряжения и тока пучка ускорителя подобный режим характеризуется мультистабильностью и может сопровождаться возбуждением в разных импульсах отличающихся мод или перескоком генерации с моды на моду в течение одного импульса. Теоретически и экспериментально продемонстрированы преимущества другой известной, но не использовавшейся ранее разновидности брэгговского резонатора - со скачком фазы гофрировки, предложенного в ИПФ РАН. Достоинством этого резонатора является наличие в центре полосы брэгговского резонанса основной моды, добротность которой может существенно превосходить добротность остальных мод. Высокая селективность резонатора данного типа приводит к дискриминации паразитных колебаний и существенно повышает стабильность одномодовой генерации в МСЭ.

Использование резонатора со скачком фазы гофрировки позволяет увеличить поперечный размер системы (сверхразмерность), но такое увеличение приводит к сближению в частотной области соседних зон брэгговского рассеяния волн, что, в свою очередь, приводит к усложнению спектра мод. Это ведет, в частности, к расщеплению основной моды резонатора со скачком фазы гофрировки, работающего на связи волн различного типа. Так, в реализованном МСЭ в качестве рабочей используется пара волн $TE_{1,1}$ и $TM_{1,1}$. В работе А.К Каминского исследованию этого важного для реализации МСЭ, ориентированных на ускорительные приложения, эффекта уделено значительное внимание, поскольку он может существенно ухудшать характеристики спектра выходного излучения и снижать стабильность одномодового режима генерации.

Для увеличения эффективности генерации в работе исследован интересный режим жесткого возбуждения многомодового МСЭ-генератора с использованием так называемой стартовой моды (диссертант использует для этой цели не очень удачный неологизм «стартерная» мода). Данная мода обладает высоким инкрементом и обеспечивает старт генератора на начальном этапе. Однако с ростом амплитуды колебания на стартовой моде становятся неустойчивыми и нелинейная стадия возбуждения генератора сопровождается перескоком на более низкочастотную моду, обеспечивающую высокий КПД. Этот красивый эффект продемонстрирован в численном моделировании, но в проведенных экспериментах он пока не привел к заметному результату, что автор резонно объясняет наличием существенного разброса параметров электронного пучка и его неустойчивостью.

Два оригинальных приема - использование обратного ведущего поля и высокоселективного брэгговского резонатора со скачком фазы гофрировки - позволили диссертанту получить в МСЭ стабильный режим одномодовой генерации с параметрами выходного излучения, позволяющими применить его в рамках актуальных приложений, в частности, для тестирования высокоградиентных ускоряющих структур. В *третьей главе* описаны эксперименты по созданию стенда на основе реализованного МСЭ-генератора и

исследованию деградации поверхности меди под воздействием циклического нагрева мощными СВЧ-импульсами. Последнее исследование представляет один из наиболее ярких известных примеров использования сверхмощных микроволновых источников. Кроме этого, в рамках ускорительного приложения продемонстрирована эффективная работа сверхмощного резонансного автогенератора на высокочастотную резонансную нагрузку, а также решены сложные задачи транспортировки мощных импульсов миллиметрового излучения, юстировки системы и запитки нагрузки с оптической точностью. В результате проведенных экспериментов в тестовом резонаторе, моделирующем температурный режим ускоряющей структуры для проекта CLIC (ЦЕРН), исследована динамика разрушения поверхности меди в зависимости от температуры нагрева и числа импульсов облучения. Полученная в работе обширная информация представляет большой интерес для проектируемых высокоградиентных ускорителей нового поколения.

В заключении диссертации сформулированы основные полученные результаты.

Диссертационная работа А.К. Каминского представляет собой законченный и полный цикл исследований предложенного автором вместе с сотрудниками нового типа МСЭ-генераторов, приведший к значительному увеличению мощности, эффективности и стабильности узкополосного режима генерации. Эта работа характеризуется значительной **научной новизной**. В работе использован комплексный подход, включающий в себя как теоретический анализ проблем, так и их всестороннюю экспериментальную проверку и получение важных новых результатов. Это делает выводы диссертации и положения, выносимые на защиту, достаточно убедительными, **обоснованными и достоверными**. Диссертация написана достаточно ясно, ее структура и оформление соответствуют требованиям Положения ВАК. **Личный вклад автора** в получение результатов, отраженных в диссертации, является определяющим. В диссертации даны необходимые ссылки на предшествующие работы по тематике исследований и описан вклад коллег.

Во время чтения диссертации у меня возник ряд вопросов и небольших замечаний, часть из которых может представлять общий интерес:

1. Как следует из приведенных результатов моделирования, предложенный диссертантом режим обратного поля характеризуется низкой чувствительностью к начальному разбросу параметров РЭП, что, в результате, и приводит к высокому КПД МСЭ. Относительно низкая чувствительность связана, по существу, с удаленностью данного режима от области циклотронного резонанса. Не обладают ли аналогичными свойствами также и режимы с большим ведущим магнитным полем при его традиционной «прямой» ориентации, в том числе в системах с линейно поляризованными ондуляторами?
2. В главе 2 обсуждается эффект расщепления основной моды, возникающий в резонаторе, действие которого основано на связи двух мод с различной поперечной структурой, в частности, мод $TE_{1,1}$ и $TM_{1,1}$, выбранных в качестве рабочих в реализованном МСЭ. Более

простой представляется связь мод с одинаковой поперечной структурой, например, $TE_{1,1}$. В диссертации не обсуждаются возможные способы предотвращения расщепления мод.

3. Последние эксперименты, проведенные в SLAC, свидетельствуют о корреляции между величиной импульсного нагрева стенки структуры при воздействии периодических СВЧ-импульсов и вероятностью СВЧ-пробоя в ней. Согласуется ли это с экспериментами, проведенными в ОИЯИ?

Сформулированные вопросы, разумеется, не снижают общей очень высокой оценки диссертационной работы А.К. Каминского, которая посвящена актуальной тематике и исследует важный круг задач, связанных с проблемой создания и использования мощных узкополосных генераторов миллиметрового диапазона длин волн. Диссертантом выполнен обширный цикл теоретических и экспериментальных исследований, получен ряд важных научных результатов, приведших к созданию МСЭ с уникальной комбинацией параметров излучения и демонстрации его использования для решения актуальных прикладных задач. Результаты, составившие основное содержание диссертации А.К. Каминского представляются вполне классическими и имеют шанс войти в учебники по физической электронике и ускорительной технике. Работы автора хорошо известны в нашей стране и за рубежом. Представленные материалы в полной мере освещены в известных журналах и материалах конференций. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертационная работа А.К. Каминского удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент
главный научный сотрудник ИПФ РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.Л. Братман

Подпись В.Л. Братмана заверяю.

Ученый секретарь ИПФ РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор



В.Е. Шапошников

Братман Владимир Львович

603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
Институт прикладной физики РАН
Тел. +7 831 416 4818
e-mail: bratman@appl.sci-nnov.ru