

УТВЕРЖДАЮ:

Декан физического факультета
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский государственный

университет имени М.В. Ломоносова»
профессор Сысоев Николай
Николаевич



2016 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Диссертация «Источники электронов с высокой яркостью пучка: динамика, диагностика, магнитные системы» выполнена на кафедре общей ядерной физики физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

В период подготовки диссертации соискатель Владимиров Иван Юрьевич являлся аспирантом кафедры общей ядерной физики физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

В 2012 г. окончил физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по специальности «физика атомного ядра и частиц».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Шведунов Василий Иванович, главный научный сотрудник отдела электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына федерального государственного бюджетного образовательного

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Основные результаты, полученные в данной работе:

1. Получены параметры источника электронов, позволяющего получить пучок с зарядом 1 нКл, среднеквадратичной длиной 1 мм, нормализованным поперечным эмиттансом меньше 4 мм мрад и регулируемой энергией 35-50 МэВ.
2. Получена теоретическая оценка воздействия вертикально-отклоняющего резонатора на средний импульс и среднеквадратичный разброс по импульсам электронов пучка в приближении, что электромагнитное поле вертикально-отклоняющего резонатора аппроксимируется полем моды TM_{110} цилиндрического резонатора без пролетного канала. Показано, что изменение среднего импульса зависит от амплитуды электромагнитного поля резонатора, от фазы влета пучка в резонатор, от длины сгустков пучка и от его энергии, а изменение среднеквадратичного разброса по импульсам также зависит от вертикальных размера и углового разброса пучка. В частности, показано, что в поле резонатора с частотой 1.3 ГГц и амплитудой магнитного поля 16.7 мТл изменение среднего импульса пучка может достигать 100 кэВ/с, а изменение среднеквадратичного разброса по импульсам – 10 кэВ/с.
3. Разработана методика измерения продольного эмиттанса пучка, основанная на аналитическом решении уравнений движения электрона в поле вертикально-отклоняющего резонатора. Показано, что на точность измерения продольного эмиттанса существенное влияние оказывают вертикальные размер и угловой разброс частиц пучка.
4. Разработана методика настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов. В основе методики настройки лежит использование настроечных плунжеров, а критерий качества настройки магнитных систем, основан на расчете траекторий частиц в измеренных полях магнитных систем.

Личный вклад диссертанта состоял в проведении численного моделирование динамики пучка электронов от фотокатода СВЧ пушки до выхода из линейного ускорителя, минимизации среднеквадратичного эмиттанса пучка СВЧ пушки по параметрам лазерного импульса и магнитного поля соленоида. Диссертант исследовал методы регулирования энергии пучка на выходе линейного ускорителя в пределах 35-50

МэВ, обеспечивающие малую величину энергетического разброса и поперечного эмиттанса пучка.

Для проекта GunLab диссертант выполнил расчеты магнита-спектрометра, разработал его конструкцию и измерил распределение магнитного поля. Им была предложена методика восстановления продольного эмиттанса пучка по его изображению на люминесцентном экране и изучено влияние электрического поля поперечно-отклоняющего резонатора на результаты измерения эмиттанса пучка.

Диссертант участвовал в сборке и настройке магнитной системы разрезного микротрона для интраоперационной лучевой терапии, в результате чего была разработана методика настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, определяется использованием хорошо апробированного программного обеспечения, сравнением результатов расчетов, выполненных с помощью различных программ, проведением расчетов для тестовых моделей с известными характеристиками, тщательной калибровкой измерительной аппаратуры, а также сравнением (где это было возможно) и хорошим совпадением расчетных и экспериментальных характеристик

Научная новизна работы обусловлена тем, что впервые получены параметры источника электронов, позволяющего получить пучок с зарядом 1 нКл, среднеквадратичной длиной 1 мм, нормализованным поперечным эмиттансом меньше 4 мм мрад и регулируемой энергией 35-50 МэВ.

Впервые получена теоретическая оценка воздействия вертикально-отклоняющего резонатора на средний импульс и среднеквадратичный разброс по импульсам электронов пучка в приближении, что электромагнитное поле вертикально-отклоняющего резонатора аппроксимируется полем моды TM_{110} цилиндрического резонатора без пролетного канала. Показано, что изменение среднего импульса зависит от амплитуды электромагнитного поля резонатора, от фазы влета пучка в резонатор, от длины ступков пучка и от его энергии, а изменение среднеквадратичного разброса по импульсам еще зависит от вертикальных размера и углового отклонения пучка. В частности, показано, что в поле резонатора с частотой 1.3 ГГц и амплитудой магнитного поля 16.7 мТл изменение среднего импульса пучка может достигать 100 кэВ/с, а изменение среднеквадратичного разброса по импульсам – 10 кэВ/с.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Vladimirov I.Yu., Pakhomov N.I., Shvedunov V.I., Kubyshin Yu.A., Rigla J.P., Zakharov V.V.* End magnets with rare earth permanent magnet material for a compact race-track microtron. // *Eur. Phys. J. Plus*, **129**, 271, 2014.
2. *Владимиров И.Ю., Пахомов Н.И., Шведун В.И., Кубышин Ю.А., Ригла Х.П., Захаров В.В.* Квадрупольная линза и магниты вывода компактного разрезного микротрона. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.*, № 6, 2014, С. 70-74.
3. *Владимиров И.Ю., Каманин А.Н., Пахомов Н.И., Шведун В.И., Кампс Т., Фелькер Й.* Спектрометр для эксперимента GunLab. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.*, № 1, 2016, С. 66-71.
4. *Kubyshin Yu.A., Rigla J.P., Vladimirov I.Yu., Pakhomov N.I., Shvedunov V.I., Zakharov V.V., Chernov I.V.* Performance of the magnetic system of a 12 MeV UPC race-track microtron. // *Proceedings of RUPAC2012*, 2012, P. 472-474.
5. *Vladimirov I.Yu., Pakhomov N.I., Shvedunov V.I., Zakharov V.V., Kubyshin Yu.A., Rigla J.P.* Rare-earth end magnets of a miniature race-track microtron and their tuning. // *Proceedings of IPAC2014*, 2014, P. 1277-1279.
6. *Vladimirov I.Yu., Pakhomov N.I., Shvedunov V.I., Zakharov V.V., Kubyshin Yu.A., Rigla J.P.* Quadrupole lens and extraction magnets of a miniature race-track microtron. // *Proceedings of IPAC2014*, 2014, P. 1283-1285.
7. *Vladimirov I.Yu., Shvedunov V.I., Kamps T., Voelker J.* Spectrometer for SRF gun. // *Proceedings of IPAC2014*, 2014, P. 3608-3610.
8. *Völker J., Barday R., Jankowiak A., Kamps T., Rudolph J., Schubert S., Wesch S., Ferrarotto A., Weis T., Vladimirov I.Yu., Shvedunov V.I.* Introducing GunLab – a compact test facility for SRF photoinjectors. // *Proceedings of IPAC2014*, 2014, P. 630-632.

Из них статьи 1-3 удовлетворяют требованиям ВАК.

Все вышеперечисленные опубликованные работы соответствуют теме диссертации и полно отражают ее содержание, а сама диссертация соответствует специальности 01.04.20 «физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Впервые разработана методика измерения продольного эмиттанса пучка, основанная на аналитическом решении уравнений движения электрона в поле вертикально-отклоняющего резонатора. Показано, что на точность измерения продольного эмиттанса большое влияние оказывают вертикальные размер и угловое отклонение пучка.

Впервые разработана методика настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов. В основе методики настройки лежит использование специальных плунжеров, а критерий качества настройки магнитных систем, основан на расчете траекторий частиц в измеренных полях магнитных систем.

Научная и практическая значимость работы обусловлена тем, что полученные параметры источника электронов с высокой яркостью пучка положены в основу генератора монохроматического рентгеновского излучения с энергией, перестраиваемой в диапазоне 20-40 кэВ, предложенного НИИЯФ МГУ совместно с ФИАН и МЛЦ МГУ.

Предложенная методика измерения продольного эмиттанса пучка электронов, учитывающая воздействие отклоняющего резонатора на энергию и энергетический спектр измеряемого пучка, позволяет увеличить точность измерений. Проведены разработка, измерения и калибровка магнитного поля магнита-спектрометра, вошедшего в состав установки по измерению параметров пучка сверхпроводящей СВЧ пушки проекта GunLab.

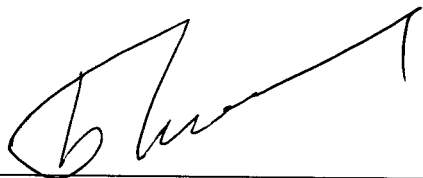
Разработанная методика настройки магнитов на основе редкоземельных магнитных материалов может быть использована при настройке магнитных систем ускорителей заряженных частиц, включая поворотные магниты, ондуляторы, магнитные линзы. В результате выполнения данной работы настроены поворотные магниты, квадрупольная линза и магниты вывода пучка для разрезного микротрона Технического университета Каталонии.

Результаты диссертации докладывались автором на научном семинаре ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ и следующих конференциях и школах: 23 всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц (24-28 сентября 2012 г., Санкт-Петербург, Россия); 5th International Particle Accelerator Conference (15-20 июня 2014 г, Дрезден, Германия); XV и XVI межвузовских научных школах молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (25-26 ноября 2014 г., 24-25 ноября 2015 г., Москва, Россия); II международной конференции «Плазменные, лазерные исследования и технологии» (25-27 января 2016 г., НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия).

Таким образом, диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи, имеющей существенное значение для развития физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники.

Диссертация «Источник электронов с высокой яркостью пучка: динамика, диагностика, магнитные системы» Владимирова Ивана Юрьевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 «физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Заключение принято на заседании кафедры общей ядерной физики. Присутствовало на заседании 11 чел. Результаты голосования: «за» – 11 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 3 от «8» ФЕВРАЛЯ 2016 г.



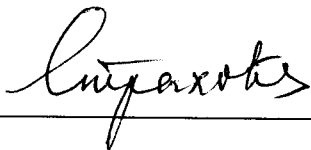
Заведующий кафедрой общей ядерной физики физического факультета МГУ доктор физико-математических наук, профессор Б.С. Ишханов

Заключение утверждено на заседании ученого совета НИИЯФ МГУ и ОЯФ (Пр. № 6)

«19» Мая 2016 г.



Директор НИИЯФ МГУ, профессор М.И. Панасюк



Секретарь ученого совета НИИЯФ МГУ и ОЯФ, профессор С.И. Страхова