

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель директора по
научной работе
НИИ «Курчатовский институт»



Р.А.Санду

2017 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Шкарубы Виталия Аркадьевича на тему
«Сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации
синхротронного излучения», представленную на соискание учёной степени
доктора технических наук по специальности 01.04.20 – «Физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника»

Актуальность темы диссертации. Важнейшей характеристикой любого источника синхротронного излучения (СИ) является спектральная яркость потока фотонов. Диссертационная работа В.А.Шкарубы посвящена созданию сверхпроводящих многополюсных вигглеров, установка которых на накопитель увеличивает поток фотонов в требуемой для экспериментов области спектра на несколько порядков. Высокий уровень магнитного поля позволяет смещать спектр излучения в востребованную на сегодняшний день жёсткую область спектра вплоть до 200 кэВ. Важнейшим эксплуатационным параметром сверхпроводящих вставных устройств является величина расхода жидкого гелия, поэтому проблема создания сверхпроводящих вигглеров, не только обладающих требуемыми спектральными характеристиками, но и работающими без расхода гелия в течение длительного периода времени, несомненно, является очень актуальной.

Общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, и заключения. По теме диссертации опубликовано 67 печатных работ. Из них 47 статей - в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК и

индексируемых в Web of Science, Scopus и РИНЦ, а также 20 докладов в трудах российских и международных научных конференций.

Во введении дан краткий обзор способов повышения спектральной яркости источников СИ и показано, что наиболее эффективно устанавливать в прямолинейные промежутки накопителей многополюсные сверхпроводящие вставные устройства. При этом важнейшим эксплуатационным требованием к таким устройствам является безостановочная работа, не требующая пополнения запаса жидкого гелия. Здесь же формулируется научная новизна, положения, выносимые на защиту и практическая ценность представляемой работы.

В первой главе даётся обзор современных сверхпроводящих вставных устройств с точки зрения их использования для увеличения спектральной яркости и жёсткости излучения. Было обосновано, что применение многополюсных вставных устройств, позволяет одновременно, смещать спектр излучения в коротковолновую область, увеличивая уровень поля за счёт сверхпроводимости и повышать яркость излучения пропорционально числу полюсов. Были сформулированы основные цели диссертации: создание многополюсных вигглеров с максимально высоким потоком фотонов за счёт достижения предельно возможного уровня поля и оптимизации параметров магнитной структуры, а также уменьшение расхода гелия до значений, допускающих непрерывную эксплуатацию вигглеров в течение года.

Во второй главе рассматриваются особенности проектирования многополюсных сверхпроводящих вигглеров, основными параметрами которых являются величина поля на орбите и период магнитной структуры. Для получения максимальной плотности потока фотонов необходимо оптимизировать длину периода и величину поля на полюсе при допустимой величине магнитного зазора, учитывая при этом энергию квантов, требуемую для проведения эксперимента, энергию электронного пучка и доступную длину промежутка. Была получена функция для расчёта максимально возможного спектрального потока излучения из многополюсных вигглеров, позволяющая находить оптимальную величину периода. Ключевым элементом данной магнитной структуры является сверхпроводящий полюс, оптимизированный на получение необходимого поля на

орбите. Была описана разработанная технология изготовления таких обмоток, позволившая стабильно достигать токов в обмотках до 90-95 % от тока короткого образца, что является высоким технологическим достижением для обмоток типа рейстрек.

В третьей главе представлены конкретные примеры разработки и создания многополюсных сверхпроводящих вигглеров для различных центров СИ в мире. Каждый из представленных вигглеров был оптимизирован по техническим требованиям под специфическую пользовательскую задачу с учётом параметров спектра излучения и особенностей конкретного накопителя. Условно эти вигглеры можно разделить на три группы в зависимости от величины поля и периода. Приводятся особенности проектирования этих устройств, как с точки зрения оптимизации потока фотонов, так и с точки зрения минимизации расхода жидкого гелия.

В четвертой главе представлены этапы совершенствования криогенной системы для достижения нулевого расхода гелия. Исследование и выявление каналов притока тепла в криостат и поиск способов их устранения привело к ряду новых технических решений, понизивших расход с ~ 2 л/ч до ~ 0.4 л/ч. В частности, были применены кевларовые подвески, азотный экран заменён двумя экранами, охлаждаемыми криокулерами с 20К и 60К степенями, а оптимизированные медные токовводы, расположенные в газе, заменены на ВТСП токовводы. Далее была предложена концепция криостата, состоящая в перехвате основных каналов притока тепла на соответствующие холодильные головки с температурами 60К, 20К и 4К посредством тепловодов. Использование блока токовводов в виде единого узла на основе криокулера с 4К ступенью, размещённого в защитном вакууме криостата, позволило снизить расход гелия до ~ 0 л/ч. Благодаря трёхкратному запасу мощности на 4К ступени и применению теплообменника в виде позолоченного медного стержня повысилась эффективность реконденсации, что позволило переохладить гелий до температуры ~ 3.3 К. В результате в герметизированном гелиевом сосуде было достигнуто пониженное остаточное давление на уровне ~ 0.4 бар, несмотря на

дополнительную тепловую нагрузку от электронного пучка и рабочий ток 1000 А.

В пятой главе изучена эффективность использования лайнера для защиты гелиевой вакуумной камеры от нагрева токами изображения при взаимодействии с электронным пучком накопителя и с синхротронным излучением. Для оценки выделяемой мощности был учтён аномальный скин-эффект, проявляющийся у сверхчистых металлов при криогенных температурах и приводящий к повышенному поверхностному сопротивлению и соответствующему увеличению нагрева камеры. Был обоснован выбор конкретной компоновки и величины межполюсного зазора. Показано, что оптимальным техническим решением является удаление из межполюсного зазора «тёплой» вакуумной камеры и перенос тепловой нагрузки со стороны пучка величиной ~20-30 Вт на медную камеру (лайнер), отделённую зазором от гелиевой камеры и охлаждаемую криокулерами со ступенью 20К. Такой подход позволил не только уменьшить приток тепла в гелий, но и повысить уровень поля благодаря уменьшению зазора.

В шестой главе даётся прогноз развития сверхпроводящих многополюсных вставных устройств, которое, по мнению автора, будет идти в направлении создания сверхпроводящих ондуляторов на основе безжидкостных криостатов с косвенным охлаждением.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна. Обоснованы и реализованы методы разработки, исследования и создания нового класса криомагнитных устройств - сверхпроводящих многополюсных вигглеров. По совокупности достигнутых параметров: плотности тока в обмотках, величине магнитного поля, экономичности криостатов, разработанные устройства превосходят мировые аналоги.

Наиболее важные результаты:

- разработана технология создания обмоток вигглеров и способов бандажирования в них пондеромоторных усилий позволившая стабильно достигать 90-95% от тока короткого образца;

- предложена и развита передовая концепция криостата с косвенным охлаждением, благодаря которой удалось снизить реальный расход гелия до нуля в криостате. Систематически исследованы режимы работы криокуллеров, в том числе механические вибрации, что крайне важно для создания прецизионных магнитов;

- обоснована и реализована универсальная методика оптимизации основных критических параметров сверхпроводящих многополюсных вигглеров для достижения требуемых спектральных и мощностных характеристик излучения;

- представлен и воплощен в техническом решении новый подход в использовании медного лайнера для защиты от нагрева со стороны электронного пучка обмоток и хладагента.

Практическая ценность результатов заключается в том, что созданные вигглеры были внедрены в эксплуатацию и используются в качестве основных генераторов излучения на большинстве крупнейших источников СИ во всем мире. Важно отметить, что эти вставные устройства могут автономно работать в условиях ограниченного доступа без расхода жидкого гелия, что значительно повышает эффективность работы накопителя.

Рекомендации по использованию результатов. Предложенные в данной работе методы и технические решения могут быть использованы при разработке сверхпроводящих многополюсных вигглеров и ондуляторов с требуемыми спектральными характеристиками и криогенными системами с нулевым расходом жидкого гелия в таких исследовательских центрах, как LSU-CAMD (США), BESSY-II (Германия), ELETTRA (Италия), CLS (Канада), DLS (Англия), LNLS (Бразилия), ALBA (Испания), AS (Австралия), ANKA (Германия) и КИСИ (Москва) и других.

Достоверность полученных результатов подтверждается не только достаточным количеством публикаций и докладов, представленных автором на различных конференциях, но и тем, что более десяти созданных при непосредственном и определяющем участии автора вигглеров успешно используются для генерации излучения на многих источниках СИ в мире являясь квалифицированным инструментом для получения новых научных знаний.

Недостатки и замечания.

Диссертация не лишена недостатков:

1. В работе использованы современные методы повышения устойчивости обмоток к импульсным локальным тепловыделениям – высокотеплоемкие добавки, бандажирование. Однако недостаточно уделено внимание анализу природы механо-термических возмущений и вызываемыми ими тренировкой и деградацией предельных токов.

2. Нарботанный опыт создания и результатов испытаний модельного ряда сверхпроводящих обмоток было бы целесообразно обобщить для перенесения на другие классы устройств.

3. Утверждение автора о целесообразности уменьшения расхода гелия за счет удвоения числа токовводов представляется спорным, т.к. такое решение усложняет конструкцию криостатов, приводит к увеличению источников тока.

4. В работе не освещены перспективы использования в вигглерах и ондуляторах быстро прогрессирующих высокотемпературных проводников с возможностью работы при $T \sim 77-50 \text{ K}$.

5. Имеются и досадные опечатки. Так, например, приводится неверная химическая формула оксисульфида гадолия: $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$ вместо $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$.

Общее заключение

Несмотря на отмеченные недостатки, которые можно рассматривать, как пожелания к перспективным направлениям работы, в целом, диссертация В.А.Шкарубы представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований была решена крупная научно-техническая проблема, имеющая важное значение для физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники: создан новый класс вставных устройств – многополюсные сверхпроводящие вигглеры для генерации синхротронного излучения в широком спектральном диапазоне.

Тема и содержание диссертации соответствует заявленной научной специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника». Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК. Текст автореферата достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа В.А.Шкарубы «Сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации синхротронного излучения» отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№ 842, от 24 сентября 2013 г.), а её автор, Шкаруба Виталий Аркадьевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Диссертация, автореферат диссертации и данный отзыв были заслушаны, обсуждены и одобрены в отделении сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт» 15 ноября 2017 года.

Отзыв составил

Начальник отдела сверхпроводниковых и криогенных устройств, Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт», доктор технических наук


М.И. Сурин

Руководитель Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт»


В.А. Демин

Главный ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт»




С.Ю. Стремоухов

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
Телефон: +7 (499) 196-9539
e-mail: nrcki@nrcki.ru