

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Шкарубы Виталия Аркадьевича

На тему: «Сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации синхротронного излучения»
по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника
на соискание учёной степени доктора технических наук.

Актуальность темы диссертации

Спектральная яркость потока фотонов является важнейшей характеристикой любого источника синхротронного излучения, от которой непосредственно зависит возможность проведения конкретных экспериментов с использованием излучения. Диссертационная работа Шкарубы В.А. посвящена разработке и созданию сверхпроводящих многополюсных вигглеров, которые позволяют увеличить поток фотонов в требуемой области спектра на несколько порядков. Использование сверхпроводящих технологий позволяет получать высокий уровень магнитного поля на обмотках и, следовательно, смещать спектр излучения в жёсткую область (вплоть до 200 кэВ), которая становится все более востребованной для исследований. Величина расхода жидкого гелия является определяющим параметром с точки зрения эффективности использования сверхпроводящих вставных устройств на реальном источнике СИ. Поэтому проблема создания сверхпроводящих вигглеров, не только обладающих требуемыми спектральными характеристиками, но и допускающих непрерывную работу с нулевым расходом гелия в течение длительного периода времени является очень актуальной.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении приведён краткий обзор способов повышения спектральной яркости источников СИ. Показано, что наиболее выгодно использовать для этой цели многополюсные сверхпроводящие вигглеры, устанавливаемые в свободные промежутки накопителя. Основным требованием с точки зрения эксплуатации таких устройств является безостановочная работа, не требующая пополнения запаса жидкого гелия. Отсюда следует актуальность создания сверхпроводящих вставных устройств, имеющих требуемые спектральные характеристики и работающих с минимальным расходом гелия.

В первой главе даётся обзор современных сверхпроводящих вставных устройств, с точки зрения их использования для увеличения спектральной яркости и жёсткости излучения. Исходя из того, что параметры многополюсных вигглеров, созданных в мире к началу 2000-х годов не удовлетворяли пользователей ни по уровню магнитного поля (не превышало ~ 6 Тл), ни по эксплуатационным характеристикам (расход гелия составлял не менее ~ 2 л/ч), автором формулируются основные задачи 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 уровня, позволяющего непрерывную эксплуатацию вигглеров в течение длительного времени (до одного года).

Во второй главе рассматриваются особенности проектирования многополюсных сверхпроводящих вигглеров, основными параметрами которых являются величина поля на орбите и период магнитной структуры. При этом уровень поля на орбите зависит от максимального поля, достигнутого на оптимизированной сверхпроводящей обмотке. Показано, что при фиксированном поле на обмотке величина поля на орбите резко спадает с ростом магнитного зазора, что требует минимизировать величину зазора, увеличивая при этом 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. Разработан метод оптимизации конструкции и технология изготовления таких обмоток, позволившая стабильно достигать токи в обмотке до 90-95 % от тока короткого образца, что является рекордом для обмоток типа рейстрек.

В третьей главе представлены конкретные примеры реализации многополюсных сверхпроводящих вигглеров для различных центров СИ в мире. Каждый из представленных вигглеров был оптимизирован под специфическую пользовательскую задачу с учётом требований к спектру генерируемого излучения и особенностей конкретного накопителя. Условно эти вигглеры можно разделить на несколько групп 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 вигглеров для достижения нулевого расхода гелия. Исследование и выявление каналов притока тепла в криостат и поиск способов их устранения привёл к использованию ряда новых технических решений, позволивших снизить расход гелия с 2 до 0.4 л/ч. В том числе, были применены кевларовые ленты для подвески холодной массы; охлаждаемый жидким азотом экран, заменён двумя экранами, охлаждаемыми криокулерами с 20 и 60 К ступенями; медные токовводы, располагаемые в гелиевом сосуде, заменены на ВТСП токовводы. Была предложена концепция криостата, состоящая в полном перехвате всех каналов притока тепла на соответствующие ступени криокулеров с температурами 60, 20 и 4 К посредством тепловых мостов необходимого сечения, расположенных в оптимальных местах. Предложение использовать блок токовводов в виде единого узла на основе криокулера с 4К ступенью, размещённого теперь уже в защитном вакууме криостата, позволило снизить расход гелия до нуля. Благодаря трёхкратному запасу холодопроизводительности на 4К ступени и применению теплообменника в виде позолоченного медного стержня удалось значительно повысить эффективность реконденсации, вследствие чего жидкий гелий переохлаждался до температуры 3.3 К. В результате в гелиевом сосуде было достигнуто пониженное давление 0.4 бар, несмотря на введенный для питания магнита ток величиной 1000 А и тепловую нагрузку от электронного пучка.

В пятой главе рассмотрено использование лайнера для защиты внутренней поверхности гелиевого сосуда 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 очень низких температурах, приводящий к повышенному поверхностному сопротивлению и соответствующему увеличению нагрева камеры. Был обоснован выбор конкретной компоновки и величины межполюсного зазора с учётом компромисса между величиной поля и нагревом камеры, так как зазор, с одной стороны, нужно минимизировать для увеличения поля, а с другой, увеличивать для уменьшения влияния пучка. 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, который, по мнению автора, будет идти в направлении создания сверхпроводящих ондуляторов на основе безжидкостных криостатов с косвенным охлаждением.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Идея создания сверхпроводящих многополюсных вигглеров базируется на анализе практики и обобщении мирового опыта по созданию сверхпроводящих вставных устройств с точки зрения их использования для увеличения спектральной яркости и жёсткости излучения. Методика расчета сверхпроводящих многополюсных вигглеров и системы их криогенного обеспечения построена на проверяемых данных, в том числе согласуется с результатами их испытаний, опубликованными в диссертации. Результаты экспериментальных работ по исследованию процессов, происходящих в сверхпроводящих вигглерах, подтверждаются обоснованностью калибровки предложенных методик и воспроизводимостью результатов исследования в различных условиях. Использовано сравнение авторских данных и результатов, полученных ранее по созданию сверхпроводящих вигглеров.

Достоверность полученных результатов подтверждается не только достаточным количеством публикаций в рецензируемых научных журналах и докладов, представленных автором на различных конференциях, но и тем, что более десятка созданных при непосредственном и определяющем участии автора сверхпроводящих многополюсных вигглеров успешно используются для генерации синхротронного излучения на многих источниках СИ в мире.

Научная новизна работы Шкарубы В.А. состоит в следующем:

1. Впервые создан новый класс вставных устройств – сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации синхротронного излучения с рекордными параметрами по величине магнитного поля и потреблению жидкого гелия, не имеющих аналогов в мире;
2. Впервые реализована новая концепция конструкции криостата на основе криокулеров, состоящая в последовательном перехвате притоков тепла на ступени криокулеров, что снизило расход гелия до нуля и создало пониженное давление в гелиевом сосуде, позволяющее автономно работать без потребления жидкого гелия, несмотря на дополнительную нагрузку от электронного пучка и введенный в магнит ток 1000 А;
3. Впервые разработана универсальная методика оптимизации параметров сверхпроводящих многополюсных вигглеров для получения требуемых спектральных и мощностных характеристик СИ на основе подбора величины периода и максимально возможного уровня магнитного поля при определённом магнитном зазоре;
4. Неоднократно продемонстрирован стабильный уровень тока на обмотках многополюсных вигглеров не менее 90-95% от тока короткого образца, что является рекордным для обмоток типа рейстрек;
5. Обоснованы и продемонстрированы преимущества схемы расположения обмоток в виде горизонтального рейстрека, по сравнению с вертикальным рейстреком для вигглеров с малым периодом и ондуляторов;

6. Впервые предложен и реализован обладающий устойчивостью к механическим деформациям конструктивный элемент вигглера - медный лайнер для защиты гелиевого сосуда, с размещенной в нем сверхпроводящей обмоткой, от нагрева со стороны электронного пучка;
7. Впервые предложены и реализованы схемы подключения обмоток многополюсных вигглеров с разделёнными токами, которые позволяют оптимально запитывать обмотки для повышения уровня поля и настраивать интегралы поля без использования дополнительных источников тока;
8. Впервые предложено и реализовано для повышения устойчивости обмоток многополюсных вигглеров к выходу из сверхпроводящего состояния использование теплоёмких добавок на основе гадолиния;
9. Впервые обоснована и реализована система защиты сверхпроводящих обмоток многополюсных вигглеров в виде цепочек холодных диодов и резисторов, обеспечивающая надёжную регистрацию и защиту сверхпроводящей обмотки при переходе в нормально-проводящее состояние.

Научная и практическая ценность результатов

С точки зрения теории, разработанная методика оптимизации параметров сверхпроводящих многополюсных вигглеров позволяет оценить величины периода и магнитного поля с учётом характеристик конкретного сверхпроводящего провода для получения максимального потока фотонов в требуемом спектральном диапазоне. Практическая ценность работы заключается в том, что созданные вигглеры были внедрены в эксплуатацию и используются в качестве основных генераторов излучения в широком спектральном диапазоне на большинстве крупнейших источников СИ во всем мире для проведения экспериментов по исследованию структуры вещества. Кроме того, использование таких устройств позволяет продлить жизнь источникам СИ предыдущих поколений, характеристики излучения которых уже не отвечают современным требованиям. 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

Предложенный и продемонстрированный в данной работе метод оптимизации параметров многополюсных магнитных структур, а также подход, основанный на перехвате всех теплопритоков на ступени криокулеров, 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.

Недостатки и замечания

В главе 1 (раздел «Постановка задачи») и главе 2 («Особенности проектирования многополюсных сверхпроводящих систем») не указаны требования к однородности магнитного поля вигглеров.

На рисунках 30, 31, 54, 58, 59 трудноразличимые цифры на осях графиков.

В таблице 2.1, колонке 3 критический ток и критическая плотность тока ниобий – титанового провода в поле 8 Тл указаны выше, чем в поле 7 Тл, что является ошибкой.

В диссертации написано, что лайнер имеет температуру 10 К, в то время как на рисунке 281 показано, что он охлаждается ступенью криокулеров с температурным уровнем 20 К.

В тексте диссертации встречаются стилистические погрешности типа:
«...значение плотности критического тока (без меди) ...» (стр.51)
«...расчётная оценка однородности поля хорошо согласуется с результатами расчётов» (стр.76)
«...по отбору мощности от испарённого гелия ...» (стр.184)
«...балансом мощности в криостате...» (стр.182), правильно «баланс теплопритоков к криостату»,
«...криокулеров с мощностью 0.5 Вт ...» (стр.221), правильно «криокулеров с холодопроизводительностью 0.5 Вт»,
«...с теплопритоками по теплопроводности по телу ...» (стр.308).

Присутствуют неточности в формуле окисульфида гадолиния Gd_2O_3S вместо Gd_2O_2S и размерности коэффициента теплопроводности Ватт/м/К вместо Вт/(м*К) (стр.174).

Автор часто использует качественные определения не вполне ясного количественного содержания типа «при охлаждении до криогенных температур», «на фоне небольших размеров», «стандартные точности изготовления», «оценка сверху».

В тексте диссертации имеется ряд опечаток, на которые указано автору.

Сделанные критические замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы, в результате выполнения которой создана методическая и экспериментальная основа технологии изготовления сверхпроводящих вставных устройств для генерации синхротронного излучения в широком спектральном диапазоне, создано более десятка уникальных сверхпроводящих многополюсных вигглеров с рекордными параметрами, как по величине магнитного поля, так и по минимальному потреблению жидкого гелия для крупнейших зарубежных и российских научных центров.

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, диссертация Шкарубы Виталий Аркадьевича на соискание ученой степени доктора технических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно-обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны в области создания сверхпроводящих многополюсных вигглеров для генерации синхротронного излучения в широком спектральном диапазоне, что соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук

Козуб

Козуб С. С.

7 ноября 2017 года

Ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

Леонид Прокопенко
Прокопенко Н.Н.

