

## ОТЗЫВ

Помощника директора Объединенного института ядерных исследований, члена-корреспондента РАН, доктора физико-математических наук, **Ширкова Григория Дмитриевича** на диссертацию **Шкарубы Виталия Аркадьевича** «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** работы Виталия Аркадьевича Шкарубы обусловлена важнейшим требованием, предъявляемым к современным источникам синхротронного излучения (СИ) - повышение спектральной яркости потока фотонов. Диссертация посвящена созданию сверхпроводящих многополюсных вигглеров, позволяющих значительно повысить спектральную яркость СИ в требуемом для экспериментов энергетическом диапазоне и, что особенно важно, в жёсткой области спектра вплоть до 200 кэВ. Основным эксплуатационным требованием к вставным устройствам является возможность автономной работы на накопителе без расхода жидкого гелия в течение длительного времени. Таким образом, задача создания автономно работающих вставных устройств, предназначенных для генерации излучения с требуемым потоком фотонов в широкой области спектра, безусловно, является очень актуальной.

**Научная новизна** работы Шкарубы В.А. заключается в следующем:

- 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;
- 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 вводимый ток  $\sim 1000$  А для питания магнита;
- 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;

- многократно продемонстрирован стабильный уровень тока на обмотках многополюсных вигглеров в размере до 90-95% от тока короткого образца, что является рекордным для обмоток типа рейстрек;
- обоснованы и продемонстрированы преимущества схемы расположения обмоток в виде горизонтального рейстрека, в сравнении с вертикальным рейстреком для вигглеров с малым периодом и ондуляторов;
- предложен и реализован конструктивный элемент криостата - медный лайнер для защиты жидкого гелия и сверхпроводящих обмоток от нагрева со стороны электронного пучка, обладающий также устойчивостью к механическим деформациям;
- предложены и реализованы схемы подключения обмоток многополюсных вигглеров с разделёнными токами, которые позволяют оптимально нагружать обмотки электрическим током для повышения уровня поля и настраивать интегралы поля без использования дополнительных источников тока;
- предложено и реализовано использование теплоёмких добавок на основе гадолиния для повышения устойчивости обмоток многополюсных вигглеров к выходу из сверхпроводящего состояния, спровоцированного локальными сбросами электронного пучка при инжекции;
- обоснованы и реализованы системы защиты сверхпроводящих обмоток многополюсных вигглеров в виде цепочек холодных диодов и резисторов, обеспечивающие надёжную регистрацию перехода в нормально-проводящее состояние, исключая ложные срабатывания.

**Практическая ценность** диссертации Шкарубы В.А. заключается в том, что созданные при его непосредственном и определяющем участии вставные устройства являются очень востребованными и активно используются для проведения экспериментов с использованием СИ на большинстве специализированных накопителях электронов в мире. Кроме того, использование такого типа вставных устройств в качестве вигглеров («затухателей») позволит уменьшать эмиттанс пучков заряженных частиц, например, в таких перспективных проектах, как, например, CLIC и ILC.

**Достоверность результатов** работы подтверждается тем, что созданные в данной работе вставные устройства успешно используются во многих научных центрах мира и их основные характеристики позволяют использовать их в качестве источников СИ для проведения реальных физических экспериментов. Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на различных международных и российских конференциях,

а по материалам диссертации опубликовано 47 печатных работ в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК.

Диссертация состоит введения, шести глав, заключения, приложения, списка литературы из 158 наименований и имеет объем 363 страницы.

**Во введении** приведён обзор способов повышения спектральной яркости источников СИ. Обосновывается, что наиболее эффективной является установка в прямолинейные промежутки накопителей многополюсных сверхпроводящих вигглеров. Показывается, что с точки зрения эксплуатации вставных устройств, важнейшим параметром является минимальный расход жидкого гелия, допускающий автономную безостановочную работу. Здесь же формулируется научная новизна, положения, выносимые на защиту и практическая ценность представляемой работы.

**В первой главе** показано, что сверхпроводящие многополюсные вигглеры позволяют не только смещать спектр излучения в жёсткую область за счёт высокого уровня магнитного поля, но и повышают спектральную яркость пропорционально числу полюсов. Здесь же формулируются 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 в таких устройствах до значений, допускающих непрерывную длительную эксплуатацию.

**Во второй главе** показано, что для получения максимальной плотности потока фотонов необходимо оптимизировать такие параметры периодической магнитной структуры, как длину периода и величину поля на орбите при допустимой величине магнитного зазора. Была получена функция для расчёта максимального спектрального потока излучения из многополюсных вигглеров, позволяющая находить оптимальную величину периода структуры с учётом энергии квантов, требуемой для проведения эксперимента, энергии электронного пучка и доступной длины промежутка. Приводятся способы оптимизации параметров ключевого элемента магнитной структуры – сверхпроводящего полюса – для получения максимального поля на орбите. Здесь же описывается разработанная технология изготовления таких обмоток, позволившая стабильно достигать величины токов в обмотках до 90-95 % от тока короткого образца, что для обмоток типа рейстрек является важным технологическим результатом.

**В третьей главе** представлены конкретные примеры реализации многополюсных сверхпроводящих вигглеров, которые условно можно разделить на три группы в

зависимости от величины поля и периода. Приводятся особенности проектирования и оптимизации параметров таких устройств под конкретную пользовательскую задачу с учётом требуемого спектра излучения и особенностей конкретного накопителя, а также с точки зрения минимизации расхода жидкого гелия.

**В четвертой главе** приведены этапы исследований по выявлению основных каналов притока тепла в криостат и поиску способов их устранения, которые привели к ряду новых технических решений, снизивших расход гелия до нуля. В частности, была предложена концепция криостата, состоящая в перехвате основных каналов притока тепла на соответствующие холодильные ступени криокулеров с температурами 60К, 20К и 4К, а также конструкция блока тоководов в виде единого узла на основе криокулера с 4К ступенью, размещённого в защитном вакууме криостата. Такой подход обеспечил тепловой баланс в криостате, при котором холодильные мощности ступеней криокулеров заведомо превышали соответствующие притоки тепла. В частности, благодаря трёхкратному запасу мощности на 4К ступени и применению теплообменника в виде позолоченного медного стержня удалось повысить эффективность реконденсации и переохладить гелий до температуры  $\sim 3.3\text{К}$  при остаточном давлении в герметизированном сосуде на уровне  $\sim 0.4$  бар, несмотря на дополнительную тепловую нагрузку от электронного пучка и рабочий ток питания магнита  $\sim 1000\text{ А}$ .

**В пятой главе** исследована возможность применения лайнера для защиты гелиевой вакуумной камеры от нагрева синхротронным излучением и токами изображения, наводимыми электронным пучком накопителя. Для оценки выделяемой мощности был учтён аномальный скин-эффект, проявляющийся у сверхчистых металлов при криогенных температурах и приводящий к повышению поверхностного сопротивления 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  $\sim 20\text{-}30\text{ Вт}$ ) на медный лайнер, отделённый зазором от гелиевой камеры и охлаждаемый 20К ступенями криокулеров. Такая концепция позволила не только уменьшить приток тепла в гелий, но и повысить уровень поля благодаря уменьшению магнитного зазора.

**В шестой главе** даётся прогноз развития сверхпроводящих многополюсных вставных устройств, которое, по мнению автора, будет направлено в сторону создания сверхпроводящих ондуляторов на основе безжидкостного косвенного охлаждения.

**В заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

Оценивая работу в целом, следует отметить систематический подход автора к решению поставленных задач. Диссертация написана хорошим языком, каждая глава является законченным исследованием со своими результатами и выводами. Методики и экспериментальные результаты четко описаны и хорошо обоснованы. Все положения, выносимые автором на защиту, опубликованы и признаны научным сообществом. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

**Рекомендации по использованию** результатов. Метод оптимизации спектрального потока фотонов из многополосных сверхпроводящих вигглеров и концепция криостата с нулевым расходом гелия на основе криокулеров, а также основные подходы и технические решения по проектированию магнитной и криогенной систем, продемонстрированные в диссертационной работе, уже успешно применяются и могут быть использованы в дальнейшем при создании многополосных сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов для различных международных и российских центров СИ.

Весь экспериментальный и методический материал в диссертации изложен очень подробно, четко и логически связно и после незначительной доработки может быть рекомендован для издания в качестве монографии.

Вместе с тем, в качестве **недостатков** следует отметить:

- «Основные результаты» более подробно сформулированы в тексте диссертации и отличаются от того, что изложено в автореферате;
- материал в диссертации изложен слишком подробно и описательно, как в научном отчете о проведенных исследованиях, а не как в научном труде, и годится больше для учебного пособия или подробной монографии;
- отсутствует ссылка на использованные данные и Рисунок 19 в разделе 4 параграфа 2.2.3;
- в списке литературы дважды под номерами 102 и 111 приведены ссылки на один и тот же доклад;
- на Рисунке 57 (стр.106) отсутствует или не пропечатана одна из кривых;
- в тексте диссертации встречаются опечатки или пропущенные слова и выражения, например на страницах 63, 94, 155, 277 и др.;

Однако отмеченные замечания нисколько не снижают общую ценность диссертационной работы, которая представляет законченное исследование, выполненное на высоком научном и техническом уровне.

В целом, можно заключить, что исследования и разработки, выполненные В.А.Шкарубой, результаты которых представлены в диссертации, позволили решить крупную научно-техническую проблему, имеющую важное значение для физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники. Были обоснованы и реализованы основные принципы проектирования и создания нового класса устройств – многополюсные сверхпроводящие вигглеры для генерации синхротронного излучения. Эти устройства нашли широкое применение в ведущих научных центрах мира и способствуют укреплению международного научного авторитета ИЯФ СО РАН им. Г.И.Будкера, который фактически монополизировал разработку подобных устройств в мире. Диссертационная работа Виталия Аркадьевича Шкарубы соответствует всем требованиям положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 01.04.20 – «физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

27.11.2017

Помощник директора ОИЯИ  
член-корреспондент РАН



Г.Д. Ширков

Главный ученый секретарь ОИЯИ  
доктор физ.-мат. наук



А.С. Сошин