ОТЗЫВ

научного руководителя

на диссертационную работу Петрова Владимира Игоревича

«Минимизация изотопического сдвига в балансной схеме датчика вращения на магнитном резонансе в ядрах ксенона»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация Петрова Владимира Игоревича «Минимизация изотопического сдвига в балансной схеме датчика вращения на магнитном резонансе в ядрах ксенона» посвящена решению одной из наиболее важных задач, стоявших пред разработчиками физических принципов работы квантовых датчиков вращения (КДВ) на основе ядерного магнитного резонанса (ЯМР) – а именно, устранению наиболее существенной систематической ошибки, свойственной этому классу устройств. Физический эффект, вызывающий эту ошибку, был обнаружен в 2013 году группой ученых из университета Висконсин-Мэдисон под руководством Т. Уокера, и назван ими «изотопическим сдвигом». Эффект проявляется в балансной схеме квантового датчика, точность которой основана на прецизионном сравнении частот ЯМР двух веществ или изотопов одного вещества, позволяющем в значительной мере подавить влияние внешних магнитных полей. Величина эффекта позволила сразу прийти к заключению о том, что его вклад в систематическую ошибку датчика на порядки превышает вклады остальных физических факторов, но ни одного удовлетворительного объяснения этому эффекту не было дано до появления первых результатов настоящей работы. Работа В.И. Петрова посвящена исследованию причин возникновения этого эффекта, изучению физических взаимодействий атомов в квантовом датчике вращения, и, как результат – решению проблемы изотопического сдвига. В работе была не только предложена и доказана экспериментально теория изотопического сдвига, но и показана возможность его обнуления, а также построена его расчетная модель, – что, в свою очередь, позволило предложить новые варианты компенсации не только самого сдвига, но и его параметрических зависимостей.

Работа была выполнена в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», экспериментальная часть работы была выполнена на лабораторной установке лаборатории Атомной Радиоспектроскопии (заведующий лабораторией – академик РАН Е.Б. Александров) Физико-Технического института им. А.Ф. Иоффе РАН. Модернизация и модификация установки под задачу исследования сигналов ЯМР в изотопах ксенона,

детектируемых реализованным в том же объеме квантовым оптическим магнитометром на электронном парамагнитном резонансе в насыщенных парах цезия, была выполнена при непосредственном участии диссертанта, о чем подробнее будет сказано далее. Далее им был проведен ряд серий длительных и кропотливых измерений, позволивших свести неизбежные ошибки при определении изотопического сдвига к достаточно малым величинам, и более того – определить его параметрические зависимости. Здесь следует упомянуть о том, что первооткрыватели эффекта не только не измерили его зависимости от основных параметров газовой среды, но и не сделали никаких предположений о существовании таких зависимостей.

Автор диссертации провёл тщательное исследование процессов в рабочей ячейке квантового датчика вращения, содержащей смесь атомов ^{133}Cs в газообразной фазе, ^{129}Xe, ^{131}Xe и буферного газа. Методом возбуждения свободной прецессии исследовались процессы оптической накачки, спин-обменной оптической накачки, прецессии магнитных моментов активных веществ газовой ячейки (^{133}Cs, ^{129}Xe, ^{131}Xe), их объёмной и пристеночной релаксации. Величина изотопического сдвига при каждом значении параметров дискриминатора определялась по четырем измерениям частоты ЯМР – по одному для двух изотопов Xe при двух противоположных круговых поляризациях накачки. Снижение неопределенности измерения до приемлемых значений требовало осреднения по значительному числу измерений, которые к тому же для снижения уровня технических магнитных и электромагнитных помех по преимуществу производились в вечернее время. Эту задачу В.И. Петров взял на себя полностью. Ряд электронных устройств для стабилизации условий в ячейке и детектирования прецессии магнитных моментов были разработаны диссертантом. Им же была рассчитана и собрана система градиентных магнитных колец для компенсации изотопического сдвига. Совместно с научным руководителем диссертант разработал численную модель для расчета эволюции магнитных моментов в ячейке, и провел сравнение ее предсказаний с экспериментом, а также ряд численных экспериментов, продемонстрировавших возможность распространения метода компенсации изотопического сдвига на ячейки малых (до 2 мм) размером при использовании компенсирующего поля, характеризующегося квадратичным пространственным градиентом. В результате было показано, что предложенная система компенсации позволяет снизить нестабильность нуля в случае стабилизации температуры примерно в 700 раз до значения $2{,}5\cdot10^{-4}$ °/час/мК, то есть до значений существенно меньших, чем те, которые обусловлены другими физическими и техническими источниками систематических ошибок.

Владимир Игоревич Петров начал работу по исследованию квантового датчика вращения в 2015 году, гипотеза о возникновении изотопического сдвига выдвинута в 2018 году, основные экспериментальные результаты были получены до 2019 года. До 2022 года были проведены численные исследования на модели, позволившие сформировать принцип действия системы подавления изотопического сдвига и его частных производных по линейной и квадратичной компонентам градиента. С самого начала В.И. Петров проявил себя как способный и упорный исследователь, и в ходе работы над диссертацией сформировался, как самостоятельный учёный. В процессе работы он изучил большой объем русско- и англоязычной литературы по предмету исследования и смежным областям. В.И. Петров всегда самостоятельно проводил модернизацию экспериментальной установки и собственно эксперимент, осуществлял первичную обработку полученных данных, проводил численные исследования и продуктивно участвовал в обсуждениях, касающихся интерпретации полученных результатов.

Все представленные в диссертации результаты получены лично Владимиром Игоревичем или при его непосредственном участии. Владимир Игоревич был докладчиком на четырех российских и международных конференциях, выступил соавтором в пяти статьях, опубликованных в российских и международных рецензируемых журналах, и в двух патентах на изобретения.

Считаю необходимым выделить следующие основные результаты, полученные В.И. Петровым:

1. Доказана гипотеза о происхождении изотопического сдвига при совпадении двух необходимых условий: наличии неоднородного магнитного поля и несовпадении времён релаксации коллективных магнитных моментов атомов изотопов ксенона ^{129}Xe и ^{131}Xe в газовой ячейке квантового датчика вращения.
2. Предложено решение проблемы нарушения баланса в традиционной схеме КДВ, предполагающее создание условий, при которых внутренние поля оказывают равнозначное влияние на средние частоты прецессии обоих изотопов ксенона.
3. Проведены подробные исследования параметров внутреннего поля и его градиента, предложен и экспериментально проверен способ компенсации изотопического сдвига приложением внешнего продольного градиента магнитного поля, проведено моделирование ИС при различных размерах ячейки и определены условия (температура и давление газовой смеси), при которых обеспечивается подавление эффекта изотопического сдвига.

4. Предложен метод подавления эффекта изотопического сдвига с помощью создания внешнего магнитного поля, имеющего линейную и квадратичную составляющие градиента вдоль оси симметрии системы. Приведены оценки, полученные с помощью численного моделирования. Показано, что в компактных ячейках длиной от 2 до 5 мм предлагаемый метод позволяет независимо изменять и обнулять как абсолютную величину сдвига, так и её частные производные по параметрам приложенного внешнего поля, выбирая оптимальную температуру для ячейки. Показано, что использование предлагаемого метода позволяет значительно (примерно в 700 раз) снизить нестабильность квантового датчика вращения на эффекте ядерного магнитного резонанса, и тем самым преодолеть основную преграду на пути к повышению его точности.

Считаю, что диссертация Петрова Владимира Игоревича удовлетворяет всем квалификационным требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам он заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Научный руководитель _____ А.К. Вершовский
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
Атомной радиоспектроскопии
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Подпись Вершовского А.К. удостоверяю
Ученый секретарь ФТИ им. А. Ф. Иоффе
кандидат физико-математических наук _____ М. И. Патров

17/I-2025 г.