**ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу **Кимеля Алексея Вольдемаровича** «Фотоиндуцированная сверхбыстрая спиновая динамика в магнитных средах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

В диссертации А.В. Кимеля разработаны способы регистрации и анализа сверхбыстрой спиновой динамики и методов фемтосекундного оптического контроля параметра порядка в магнитных средах, а также выполнены исследования эффективных механизмов действия поляризованного/неполяризованного света на спиновые степени свободы посредством оптической модуляции спин-орбитального и/или обменного взаимодействий.

Принципиальной проблемой, ограничивающей развитие современных технологий обработки и хранения данных, является преобладание магнитного способа записи информации, реализуемого за счет переключения намагниченности в магнитных средах между двумя различными, легко идентифицируемыми и устойчивыми магнитными состояниями. Принципиальные недостатки этого метода, обеспечивающего высокие скорости (~1 Тб/с) и плотности (>1 Мб/мм2) записи информации, очевидны. Запись информации сопровождается генерацией коротких импульсов магнитного поля и, как следствие, большими потерями энергии, растущими пропорционально квадрату скорости записи. С другой стороны, дальнейшее увеличение плотности записи ограничено размерами магнитных ячеек – доменов, а переход к субмикронному/нанометровому диапазону размеров предъявляет качественно новые требования к функциональным материалам и чувствительным элементам магнитных систем хранения данных. Таким образом, поиск новых способов записи и обработки информации в пикосекундном диапазоне времен и на нанометровом масштабе размеров является одной из важнейших задач, которые ставит перед фундаментальной наукой современное общество.

Интересной альтернативой для записи магнитной информации без применения внешних магнитных полей является возможность управления магнитным порядком вещества с помощью света. Действительно, обратный эффект Фарадея, связанный со снятием вырождения между двумя направлениями спина под действием света с круговой поляризацией, показывает, что электромагнитная волна способна действовать на спины как эффективное магнитное поле. Проблемы возникают при переходе к пикосекундным и субпикосекундным временам возмущения магнитных сред, намного меньшим характерных времен установления термического равновесия (100 пс), так как в этом случае ультракороткий электромагнитный импульс приводит систему в сильно неравновесное состояние. Поскольку в таком состоянии стандартные подходы для описания магнитной динамики и магнитных фазовых переходов становятся неприменимы, научная проблема поиска эффективных методов фемтосекундного оптического контроля магнитных свойств материалов, сформулированная в диссертации А.В. Кимеля, несомненно, **актуальна,** аее решение способствует дальнейшему развитию представлений об отклике системы взаимодействующих спинов на сверхкороткое лазерное возбуждение.

В основе научного исследования А.В. Кимеля лежит методика спектроскопии временного разрешения (pump-probe), модифицированная для решения конкретных экспериментальных задач с учетом особенностей исследуемых магнитных материалов и магнитооптических эффектов. Именно универсальный характер методики позволил поставить и успешно решить целый ряд научных задач на стыке когерентной нелинейной оптики и магнетизма. Комплекс научных задач, направленных на достижение цели диссертации, включает исследования особенностей магнитооптического отклика материалов на сверхбыстрое лазерное возбуждение, изучение различных механизмов сверхбыстрого действия света с круговой и линейной поляризацией на спины, а также анализ возможностей сверхбыстрого управления спиновыми волнами и спин-поляризованными токами. Таким образом, **корректность** постановки научной задачи диссертационной работы А.В. Кимеля, направленной на поиск и практическую реализацию экспериментальных методов исследования сверхбыстрой спиновой динамики в магнитоупорядоченных средах, не вызывает сомнений.

В качестве объектов исследования автор выбрал различных представителей класса магнитных диэлектриков и полупроводников на основе редкоземельных и переходных металлов, включающих ортоферриты DyFeO3, TmFeO3 и YFeO3, железные и галлиевые гранаты Y3Fe5O12, Tb3Ga5O12 и Lu1.69Y0.65Bi0.66Fe3.85Ga1.15O12, антиферромагнетик с коллинеарной спиновой структурой KNiF3, ферромагнитные полупроводники EuTe и Hg0.92Cd0.08Cr2Se4, борат железа FeBO3, а также гетероструктуры с интерфейсом Co/Pt. Именно проверка общности наблюдаемых эффектов на широком наборе соединений с различными типами кристаллической структуры и магнитного порядка с адаптацией экспериментальных методик, имеющихся в распоряжении автора работы, позволила эффективно решить поставленные научные задачи. При этом корреляция оригинальных экспериментальных и теоретических данных с результатами, полученными в ведущих зарубежных и российских научных группах, определяют **обоснованность** и **достоверность** результатов, полученных в диссертационной работе А.В. Кимеля.

**Важным научным достижением** диссертационной работы является экспериментальное доказательство возможности воздействия на спины импульса электромагнитного излучения оптического диапазона подобно импульсу магнитного поля, длительность которого равна длительности лазерного импульса (т.е. порядка 100 фс), а индукция достигает нескольких Тесла. Автором показано, что сверхбыстрое воздействие света на спины может быть достигнуто как в результате нерезонансного, так и резонансного оптического возбуждения электро-дипольных переходов в магнитных диэлектриках и полупроводниках с различным типом магнитного порядка. В работе продемонстрирована возможность модуляции спин-орбитального и обменного взаимодействия за счет электродипольных переходов, возбуждаемых светом. Важно отметить, что возбуждение спиновых волн в центре зоны Бриллюэна и генерация электрических токов в нецентросимметричных средах (в случае модуляции спин-орбитального взаимодействия) и генерация когерентных магнонов нанометровых длин волн (в случае модуляции обменного взаимодействия) открывают пути развития спиновой и спин-волновой электроники до рекордно высоких частот терагерцового диапазона. При этом первые наблюдения целого ряда фемтосекундных магнитооптических эффектов (обратные эффекты Фарадея и Коттона-Мутона в DyFeO3, Y3Fe5O12 и FeBO3, обратного магниторефрактивного эффекта в YFeO3, TmFeO3, FeBO3 и EuTe, управляемой генерации когерентных спиновых волн на границе зоны Бриллюэна в KNiF3, управляемой генерации фототоков на интерфейсах Co/Pt), а также демонстрация новой концепции магнитооптического модулятора на основе взаимодействия света с релятивистской неоднородностью в Tb3Ga5O12 не оставляет сомнений в **научной новизне** результатов, полученных в диссертационной работе А.В. Кимеля.

Результаты диссертационной работы изложены на 211 страницах машинописного текста, Диссертация состоит из введения, литературного обзора, пяти глав с оригинальными результатами исследований и выводами по каждой главе, а также заключения и списка литературы, включающего 302 наименования. Диссертация содержит 49 рисунков и 2 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и научные задачи исследования, указана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту. Кроме этого, в этой части диссертации приведена информация об апробации результатов работы, публикациях и личном вкладе автора.

В **первой главе** представлен обзор литературы, посвященный исследованию динамики намагниченности в магнитоупорядоченных материалах. Автор анализирует основные тенденции и проблемы в исследованиях спиновой динамики, подробно рассматривая теоретические основы взаимодействия фемтосекундного излучения с магнитной средой в рамках моделей Ландау-Лифшица-Гилберта и Ландау-Лифшица-Блоха. Заслуживает внимания детальный обзор экспериментальных методик для исследования сверхбыстрых процессов намагниченности, а также анализ термических эффектов, наблюдаемых при лазерном возбуждении и сверхбыстром размагничиванииметаллических ферромагнетиков, магнитных диэлектриков, полупроводников и полуметаллов.

Во **второй главе** подробно рассмотрены различные аспекты сверхбыстрого воздействия света на спины через спин-орбитальное взаимодействие. Из феноменологического анализа проблемы взаимодействия света с магнитной средой автор делает вывод о том, что свет может действовать на спины как эффективное магнитное поле, инициируя обратные эффекты Фарадея и Коттона-Мутона. Из экспериментального наблюдения фемтосекундного обратного эффекта Фарадея в DyFeO3 и Y3Fe5O12 были обнаружены осцилляции с частотой около 300 ГГц, отвечающей частоте антиферромагнитного резонанса. Автором показано, что к возбуждению наблюдаемых спиновых осцилляций приводит импульс длительностью 100 фс и интенсивностью 30 мДж/cм2, действующий на спины как эффективное магнитное поле 0,3 Тл. На примере FeBO3 продемонстрирована возможность возбуждения спиновых колебаний за счет обратного эффекта Коттона-Мутона на частотах низшей моды антиферромагнитного резонанса.

В **третьей** главе показано, как свет действует на спины через обменное взаимодействие. Сверхбыстрый механизм действия света электрической компоненты света на обменное взаимодействие реализуется благодаря обратному магниторефрактивному эффекту, позволяющему воздействовать на обменное взаимодействие между спинами на фемтосекундных временах практически в любом материале. Автор доказывает существование подобных эффектов в широком классе материалов, включая редкоземельные ортоферриты, борат железа, гематит, а также теллурид европия. На примере KNiF3 продемонстрирована возможность генерации когерентных магнонов на границе зоны Бриллюэна за счет сверхбыстрого изменения обменного взаимодействия. Результаты работы открывают возможность управления когерентными магнонами при помощи приемов когерентного контроля, что открывает новые перспективы для фемтосекундной наномагноники – концептуально новой технологии обработки информации.

В **четвертой** главе анализируются возможные применения сверхбыстрых опто-магнитных явлений в терагерцовых приложениях спинтроники. В ферромагнитном полупроводнике Hg0.92Cd0.08Cr2Se4 впервые обнаружен магнитооптический эффект, возникающий под действием широкополосных импульсов со спектром частот в диапазоне от 300 ГГц до 2 ТГц. Показано, что вращение и наведенная эллиптичность поляризации являются линейным дихроизмом и двупреломлением, индуцированными магнитным порядком. Величины магнитооптического эффекта (до 4,0⋅103 рад⋅Tл-1м-1) показывают перспективность магнитооптики в качестве инструмента исследования магнитотранспортных свойств материалов на частотах терагерцового диапазона.

В **пятой** главе анализируются проблемы, связанные с отсутствием надежной методики, свободной от артефактов и чувствительной к динамике намагниченности в субпикосекундном масштабе времени. Рассмотрены проблемы динамики магнитооптических явлений в соединениях редкоземельных металлов, возникающие из-за необходимости учета вклада орбитального магнетизма и различных пропорций спиновых и орбитальных намагниченностей неэквивалентных подрешеток. Автором сравнивает результаты измерений сверхбыстрой спиновой динамики в сплавах GdFeCo, NdFeCo и чистом Co с помощью магнитооптического эффекта Керра и с помощью метода терагерцовой эмиссии. Обнаружено, что в NdFeCo присутствует более быстрая динамика намагниченности, которую невозможно детектировать с помощью магнитооптического эффекта Керра. Во второй части главы на примере Tb3Ga5O12 рассмотрен аномально большой эффект Фарадея в соединениях редкоземельных металлов, который требует корректного учета эффектов распространения при анализе сверхбыстрой спиновой динамики. Из анализа спектральных зависимостей магнитооптического эффекта Фарадея и коэффициента преломления показано, что осцилляции в эффекте Фарадея связаны не со спиновой динамикой, а вызваны локальным оптическим двулучепреломлением, наведенным в среде импульсом накачки.

В **шестой главе** автор приводит результаты исследования сверхбыстрого воздействия света на намагниченность и динамику электрических токов в структурах Co/Pt. В работе впервые продемонстрировано явление сверхбыстрой генерации фототоков на границах раздела магнитных мультислоев, открывающее возможности управления направлением субпикосекундных импульсов тока путем изменения направления круговой поляризации возбуждающего света.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты работы.

Совокупность полученных результатов по разработке способов фемтосекундного оптического контроля магнитных явлений в соединениях на основе редкоземельных и переходных металлов и практической реализации методик для экспериментального изучения сверхбыстрой спиновой динамики в конденсированных средах создает надежную основу для проверки теоретических подходов и моделей, адекватно описывающих отклик системы спинов на сверхкороткое лазерное возбуждение. В качестве **основных** **научных результатов**, полученных А.В. Кимелем в диссертационной работе, необходимо отметить следующие:

1. Показано, что импульс света является уникальным возбуждением в магнетизме, воздействующим на спиновую подсистему аналогично импульсу магнитного поля с длительностью, равной длительности лазерного импульса (порядка 100 фс) и с магнитной индукцией, достигающей нескольких Тесла.

2. На примере широкого класса магнитных диэлектриков и полупроводников продемонстрировано, что сверхбыстрое воздействие света на спины может быть реализовано через резонансное и нерезонансное оптическое возбуждение электро-дипольных переходов.

3. Идентифицирован механизм сверхбыстрого воздействия света на спины, связанный с эффективным изменением спин-орбитального или обменного взаимодействия в магнитоупорядоченных средах за счет инициируемых электродипольных переходов.

4. Экспериментально открыта возможность импульсной генерации когерентных спиновых волн (магнонов) в магнетиках и электрических токов в нецентросимметричных средах.

Следует особо отметить последний из основных научных результатов диссертационной работы А.В. Кимеля, который открывает возможность изучения процессов и создания элементной базы спинтроники и магноники на рекордно высоких частотах терагерцового диапазона. Выполненные автором исследования сверхбыстрой динамики намагниченности в магнитных материалах могут инициировать создание принципиально новых технологий записи информации с помощью света, способных достичь необходимого уровня конкурентоспособности. Практическая значимость представленной работы состоит в разработке фундаментальных основ функционирования устройств микро- и наноэлектроники на базе ферромагнитных и мультиферроидных материалов, а также в развитии оптических и нелинейно-оптических неразрушающих методик для исследования параметров быстропротекающих процессов в таких средах. Полученные в работе результаты могут быть рекомендованы к использованию в ФИАН, ФТИ РАН, НИЯУ «МИФИ», ИОФ РАН, НИЦ "Курчатовский институт", МФТИ, ИФ СО РАН и ряде других научных организаций.

В целом диссертационная работа А.В. Кимеля представляет собой **законченное научное исследование**, посвященное актуальной проблеме исследования процессов сверхбыстрой спиновой динамики и возможностей фемтосекундного оптического контроля параметра порядка в магнитоупорядоченных средах. В диссертации **решены поставленные задачи** по изучению особенностей магнитооптического отклика материалов на сверхбыстрое лазерное возбуждение, идентификации механизмов сверхбыстрого действия света с круговой и линейной поляризацией на магнитные моменты, а также по анализу возможностей сверхбыстрого управления спиновыми волнами и спин-поляризованными токами. Автором продемонстрирован принципиально новый метод магнитооптической модуляции, позволяющий достичь частот терагерцового диапазона и открывающий новые возможности для сверхбыстрой обработки и передачи данных методами фотоники.

Результаты диссертации А.В. Кимеля изложены в 23 печатных работах, все работы опубликованы в высокорейтинговых международных рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Sciences и Scopus. Результаты диссертационной работы неоднократно докладывались на научных конференциях национального и международного уровня. Основное содержание диссертации полностью отражено в автореферате и опубликованных работах. Личный вклад автора в работу детально описан в диссертации и не вызывает сомнений.

В то же время по работе А.В. Кимеля следует высказать ряд замечаний, которые кратко перечислены ниже:

1. При обсуждении магнитной динамики, индуцированной фемтосекундным лазерным импульсом в FeBO3 вследствие обратного эффекта Коттона-Мутона автор подчеркивает, что изменение фазы осцилляций поляризации идеально соответствует модели для точечной группы бората железа (стр.74). Однако, данные рис. 13в демонстрируют ярко выраженную асимметрию, которая наглядно видна из сопоставления значений угла поворота плоскости поляризации для Θ=-90° и Θ=+90° и, как следует из сравнения экспериментальных и расчетных данных, не описывается в рамках феноменологической модели (20) (стр.58).

2. В качестве аргумента в пользу гипотезы о возбуждении квази-антиферромагнитной моды благодаря изменению отношения обменных констант D/J в работе приводятся временные зависимости амплитуды терагерцового излучения в FeBO3 для двух противоположных ориентаций намагниченности. Вместе с тем, наблюдаемое изменение фазы сигнала на 180° может быть связано с ошибкой определения времени задержки, поскольку, как следует из данных рис.26, напряженность электрического поля в первом полупериоде осцилляций положительна независимо от направления намагниченности.

3. Из текста диссертации непонятно, каким образом из изменения соотношения обменных констант D/J оценивалась величина эффективного магнитного поля. В работе Δ(D/J)≈0,01% соответствует полю порядка 0,01 Тл (стр. 103).

4. При обсуждении светоиндуцированной динамики обменного f-d взаимодействия в теллуриде европия (стр.110) автор указывает на возможное возбуждение квази-ферромагнитной моды за счет фотоиндуцированного изменения магнитной анизотропии при переходе иона европия в ионизованное состояние (Eu3+, 4f6). Однако, несмотря на заметный рост орбитальной компоненты до L=3 магнитокристаллическая анизотропия и обменное взаимодействие могут существенно уменьшаться при переходе к немагнитному основному состоянию Eu3+ с нулевым магнитным моментом (J=L–S=0).

5. Для оценок пиковой амплитуды фототока в гетероструктурах на основе Co/Pt (стр.171) предполагается, что ток локализован в интерфейсной области порядка 0,5 нм. Между тем, по данным измерений коэффициента отражения рентгеновских лучей (стр.163) шероховатость границы между слоями платины и кобальта составляет 1 нм, так что оценки пиковой амплитуды фототока (~1 ГА/м2) представляются завышенными.

6. К сожалению, автору не удалось избежать ряда опечаток и неточностей. На стр.56 использован неудачный термин «изоляционные материалы», на рис.23 химические формулы соединений на панелях б) и в) не соответствуют обозначениям, приведенным в подписи к рисунку. На стр.143 (рис.41а и формула 26) для одного и того же параметра используются три обозначения (l, d и L).

Сделанные замечания не снижают **общей высокой положительной оценки** диссертационной работы А.В. Кимеля. Совокупность результатов по разработке методов фемтосекундного оптического контроля магнитных явлений в соединениях на основе редкоземельных и переходных металлов и практической реализации методик для экспериментального изучения сверхбыстрой спиновой динамики в конденсированных средах позволяет квалифицировать работу А.В. Кимеля как **крупное научное достижение** в области фундаментальных основ оптоэлектроники, спинтроники и магноники.

Диссертация «Фотоиндуцированная сверхбыстрая спиновая динамика в магнитных средах» обладает внутренней целостностью, выполнена на высоком научном уровне, отвечает паспорту специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям согласно пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года за № 842.

Автор диссертационной работы – Кимель Алексей Вольдемарович – несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент

Временно исполняющий обязанности
заместителя директора ИОФ РАН по научной работе
Глушков Владимир Витальевич,

доктор физико-математических наук, доцент

22.05.2018

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт общей физики им. А.М.Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН),

119991, Москва, ГСП-1, ул.Вавилова, д.38

телефон: +7(499)503-8253

факс: +7(499)135-8129

e-mail: glushkov@lt.gpi.ru

Подпись В.В.Глушкова заверяю

Ученый секретарь ИОФ РАН, д.ф.-м.н. С.Н.Андреев