

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАиЭ СО РАН)

УДК 535.33/34: 621.373.826  
№ гос. регистрации:  
AAAA-A21-121021800168-4  
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИАиЭ СО РАН  
чл.-корр. РАН

\_\_\_\_\_  
С.А. Бабин  
« 22 » декабря 2022 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Интерференционные эффекты и эффекты, связанные со столкновениями,  
для атомов газа, взаимодействующих с излучением.**

(промежуточный)

Направления ПФНИ: 1.3.5.1. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, в том числе в сверхсильных полях; создание лазеров сверхкоротких сверхмощных импульсов излучения  
1.3.5.2. Перспективные методы оптических квантовых вычислений и квантовых коммуникаций  
1.3.5.5. Физика лазеров и лазерных материалов; нелинейные оптические явления

Протокол Ученого совета ИАиЭ СО РАН  
№ \_\_ от «23» декабря 2022 г.

Руководитель НИР  
научный руководитель  
Института, академик

\_\_\_\_\_  
22.12.2022  
подпись, дата

А.М. Шалагин

Новосибирск 2022

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы, академик	<hr/>	А.М. Шалагин (реферат, введение, заключение, приложение, раздел 3)
	(подпись)	
Ответственный исполнитель, г.н.с., д.ф.- м.н.	<hr/>	П.Л. Чаповский (раздел 1)
	(подпись)	
Ответственный исполнитель, г.н.с., д.ф.- м.н.	<hr/>	Л.В. Ильичев (раздел 2)
	(подпись)	
Ответственный исполнитель, в.н.с., д.ф.- м.н.	<hr/>	К.А. Насыров (раздел 4)
	(подпись)	
Ответственный исполнитель, в.н.с., д.ф.- м.н.	<hr/>	А.И. Пархоменко (раздел 3)
	(подпись)	
Исполнители: Н.с., к.ф.-м.н.	<hr/>	В.А. Томилин (раздел 2)
	(подпись)	
И.о. инженера- исследователя	<hr/>	А.М. Ростом (раздел 2)
	(подпись)	
Старший инженер- программист	<hr/>	Е.В. Ильичева (оформление)
	(подпись)	

## РЕФЕРАТ

Всего 23 с., 15 рисунков, 10 источников.

**Ключевые слова:** *ультрахолодные атомы, квантовые корреляции, геометрическая фаза, причинные петли, конденсат Бозе-Эйнштейна, пост-селекция, лазерная генерация, спектральная линия, столкновительная релаксация,*

Создан непрерывный параметрический генератор света (ПГС) для средней ИК области спектра. ПГС преобразует излучение волоконного иттербиевого лазера  $\lambda_p = 1.064\mu$  (максимальная мощность 50 Вт) в излучение холостой волны с длиной волны в средней ИК области. Зеркала кольцевого резонатора ПГС имеют высокий коэффициент отражения для сигнальной волны и предельно малые коэффициенты отражения для накачки и холостой волн. В ПГС используется нелинейный кристалл MgO.

Получены результаты в трёх перспективных направлениях развития квантовой автономной инерционной навигации: проанализировано явление потери когерентности конденсатом в предложенной ранее схеме гибридного атомарно-оптического гироскопа, предложены схема оптического гироскопа на двухмодовом «сжатом» вакууме и схема гироскопа на основе генерации геометрической фазы в атомарном конденсате.

Предложена новая схема квантовой обратной связи для приготовления экзотических состояний атомарного конденсата.

Доказана перспективность предложенной ранее схемы квантовой сверхчувствительной метрологии для регистрации запутанности, порождённой гравитационным взаимодействием.

На основе пятиуровневой модели атомов активной среды разработана аналитическая модель лазера на метастабильных атомах инертных газов с поперечной диодной накачкой. Работа лазера описывается сложной системой дифференциальных уравнений, которая в общем случае поддается решению только численными методами. При не слишком малом коэффициенте отражения выходного зеркала  $R_0$  система дифференциальных уравнений сильно упрощается и допускает аналитическое решение, которое позволяет исчерпывающе определить любые энергетические характеристики лазера.

Проведены расчеты магнитооптических спектров флуоресценции при поглощении монохроматического излучения, резонансного переходу на второй возбужденный уровень атомов щелочного металла. Для этого разработана принципиально новая математическая модель и ее численная реализация для моделирования магнитооптических резонансов.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Создание автоматизированного спектрометра в среднем ИК диапазоне на основе непрерывного параметрического генератора света (ПГС).....	6
2. Исследование интерференции в открытых квантовых системах в присутствии петель обратной связи и причинных петель.....	11
3. Теоретическое исследование работы лазера на метастабильных атомах инертных газов с поперечной диодной накачкой.....	15
4. Расчеты магнитооптических спектров флуоресценции при поглощении монохроматического излучения резонансного переходу на второй возбужденный уровень на примере атомов щелочных металлов.....	17
Заключение.....	19
Список использованных источников.....	22
Приложение (план исследований в 2023 году по проекту).....	23

## Введение

В настоящее время широкое распространение получили уникальные волоконные лазеры. Они имеют мощность до  $10^2$  Вт, высокое качество выходного излучения и ширину линии генерации на уровне 10 кГц. Для решения многих задач квантовой электроники существенно, что излучение таких волоконных лазеров может быть эффективно преобразовано по частоте методами нелинейной оптики, например, с помощью параметрических генераторов света (ПГС). Здесь исключительно важными оказываются непрерывные ПГС для средней ИК области, для которой отсутствуют перестраиваемые по частоте лазеры. Целью нашей работы является создание перестраиваемого по частоте ПГС для применения в исследованиях ядерных спиновых изомеров молекул, в первую очередь молекул воды и этилена. Эти молекулы имеют сильные колебательно-вращательные линии поглощения в средней ИК области.

В настоящее время мы являемся свидетелями появления новых принципиально квантовых способов обработки информации и проведения сверхточных измерений. На первый план в квантовой оптике, как естественной платформы перспективных технологий, выходят проблемы уточнения смысла базовых понятий квантовой физики. То, что ещё три десятилетия назад было предметом метафизического осмысления, приобретает практическую важность. В первую очередь это касается понятия квантового состояния. Задаче прояснения его статуса, онтологической и эпистемологической составляющих, подчинено теоретическое исследование эволюции простейших систем в присутствии замкнутых причинных петель (СТС – Closed Time-like Curves), начатое в 90-е годы Д. Дойчем. В многочисленных работах в качестве системы рассматривается кубит. Это простейший выбор, оставляющий массу вопросов о применимости полученных результатов к более сложным системам, например, многофотонным состояниям. Актуальное сравнение различных концепций СТС на новом поле является одним из направлений в плане работ. Идеино близко к этому направлению примыкают исследования различных аспектов квантовой обратной связи и – более широко – зарождающейся квантовой кибернетики.

В области квантовой метрологии актуальным и стратегически важным является создание систем автономной инерциальной навигации. Ожидается появление новых поколений квантовых гиromетров, функционирующих на основе известного эффекта Саньяка, но использующих вместо света волновые свойства атомарного конденсата Бозе-Эйнштейна.

В последние годы интенсивно экспериментально и теоретически исследуются лазеры на метастабильных атомах инертных газов с диодной накачкой [1–14]. Интерес к этим лазерам обоснованно связан с их потенциальной возможностью генерировать излучение с высокой мощностью, имея при этом высокую эффективность преобразования излучения накачки в лазерное излучение. Эти лазеры по своей концепции аналогичны лазерам на парах щелочных металлов с диодной накачкой [15–18], но имеют то преимущество, что газовая среда является химически инертной. В настоящей работе в рамках пятиуровневой модели частиц активной среды разработана аналитическая модель лазера на метастабильных атомах инертных газов с поперечной диодной накачкой.

Исследование магнитооптических резонансов в разных атомарных системах вызывает постоянный интерес для задач нелинейной спектроскопии высокого разрешения, в частности, для прецизионного измерения магнитного поля. В настоящей работе развита теория для описания магнитооптических резонансов при взаимодействии излучения с атомом щелочного металла в условиях резонанса с переходом на второй возбуждаемый уровень с учетом тонкого и сверхтонкого расщепления уровней, а также спонтанных переходов через промежуточные уровни в присутствии магнитного поля.

### ***1. Создание автоматизированного спектрометра в среднем ИК диапазоне на основе непрерывного параметрического генератора света (ПГС).***

В 2022 году нами создан непрерывный ПГС для средней ИК области [1,2]. Схема кольцевого резонатора ПГС представлена на Рис. 1. ПГС преобразует излучение волоконного иттербиевого лазера  $\lambda_p = 1.064\mu$  (модель YLR-50-1064-LP-SF, максимальная мощность 50 Вт, фирма IPG Photonics, США) в излучение холостой волны с длиной волны в средней ИК области. Зеркала кольцевого резонатора ПГС имеют высокий коэффициент отражения для сигнальной волны и предельно малые коэффициенты отражения для накачки и холостой волн. В ПГС используется нелинейный кристалл MgO : PPLN (HC Photonics, Тайвань).

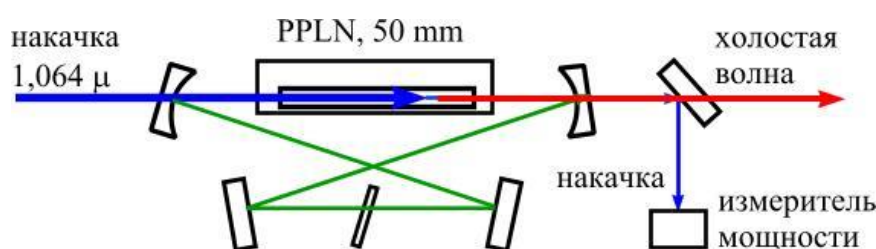


Рисунок 1. Схема кольцевого резонатора ПГС.

Частота холостой волны ПГС стабилизирована с помощью прецизионного измерителя длин волн лазерного излучения WS-6-IR3 (фирма Ангстрем, Новосибирск). На Рисунке 2 представлена фотография созданного ПГС. Важной особенностью созданного ПГС является защита кольцевого резонатора от потоков воздуха с помощью пластикового канала с малым поперечным сечением, напечатанного на 3D принтере.

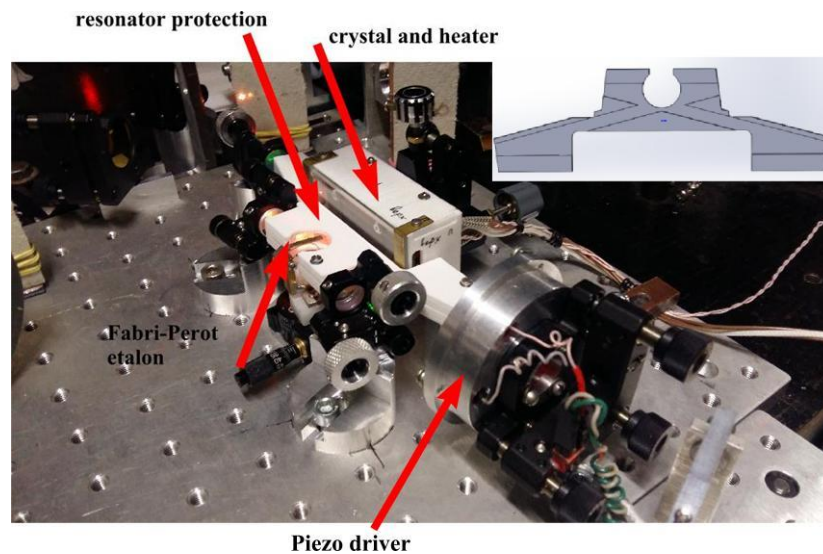


Рисунок 2. Фотография ПГС для средней ИК области. На вставке приведена фотография защитного канала кольцевого резонатора.

На Рисунке 3 представлено изменение во времени частоты холостой волны в режиме свободной генерации и в режиме стабилизации частоты с помощью измерителя длин волн WS-6-IR3. Среднеквадратичная ошибка частоты холостой волны в режиме стабилизации составляет 3~МГц.

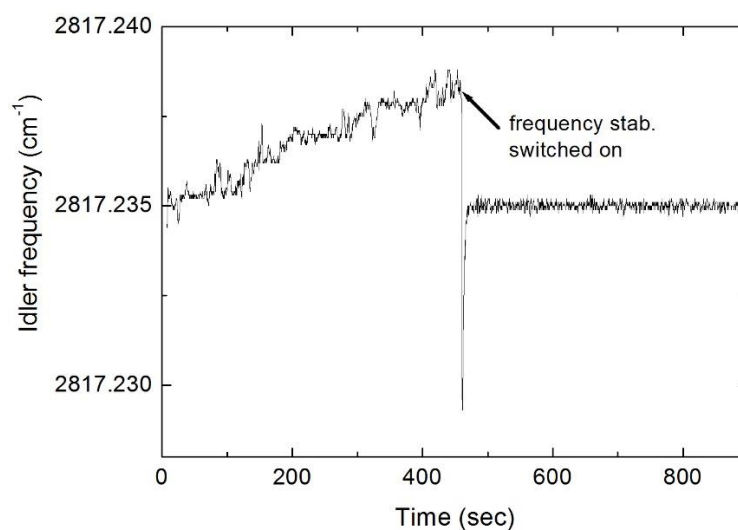


Рисунок 3. Изменение во времени частоты холостой волны ПГС в режиме свободной генерации и в режиме стабилизации частоты с помощью измерителя длин волн WS-6-IR3.

Частоту холостой волны ПГС можно перестраивать несколькими способами: используя поляризационные дорожки в нелинейном кристалле с разным периодом поляризации, изменяя температуру нелинейного кристалла и изменяя длину кольцевого резонатора. При этом, измеритель длин волн лазерного излучения позволяет управлять частотой холостой волны во времени. Примеры такого управления частотой холостой волны по синусоидальному и пилообразному законам при сканировании длины резонатора ПГС, представлены на Рисунке 4.



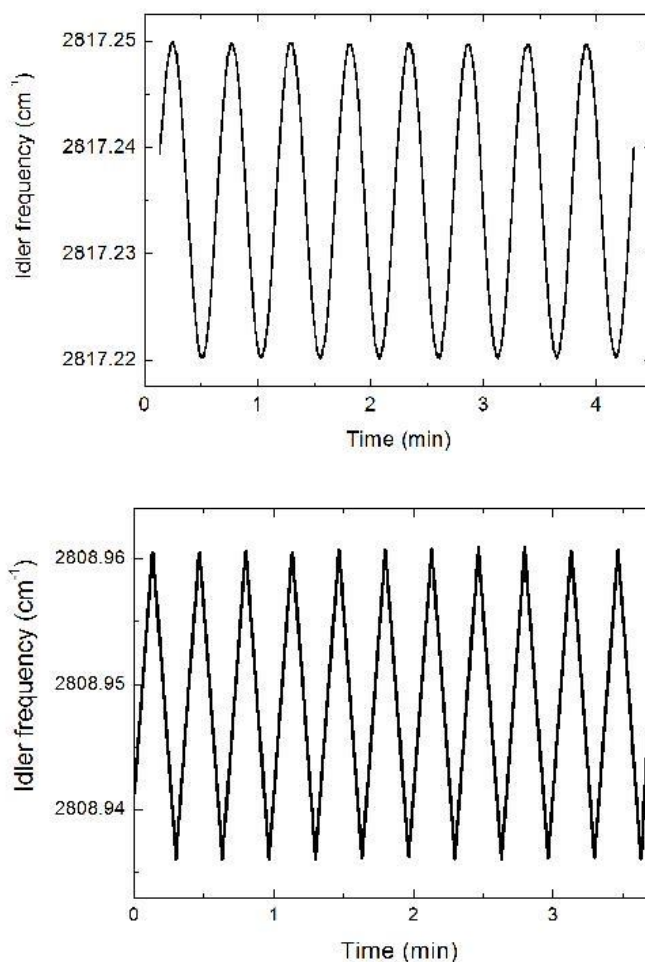


Рисунок 4. Перестройка частоты холостой волны ПГС по синусоидальному (*верхний рисунок*) и по пилообразному (*нижний рисунок*) законам.

Преобразование излучения в созданном ПГС осуществляется очень эффективно. Так, например, при мощности накачки  $P_p = 10$  Вт, истощение мощности накачки равно  $D_p = P_p - \delta_p = 9.4$  Вт. Мощность генерируемой холостой волны при этом равна  $D_i = 2.8$  Вт. Здесь,  $P_p$  и  $\delta_p$  обозначают мощности волны накачки на выходе ПГС при заблокированном и открытом резонаторе, соответственно. Для эффективного нелинейно-оптического взаимодействия волн использована фокусировка волны накачки, большая интенсивность сигнальной волны в резонаторе ПГС, которая достигает в центре кристалла  $2.4$  МВт/см<sup>2</sup> и периодическая поляризация нелинейного кристалла.

Величина истощения мощности накачки  $D_p$  составляет основу полуэмпирической модели энергетических характеристик непрерывного ПГС [1,2]. В ПГС осуществляется распад фотонов накачки на фотоны сигнальной и холостой волн. При этом точно выполняется закон сохранения энергии фотонов:  $\omega_p = \omega_s + \omega_i$  и равенство чисел распавшихся

и родившихся фотонов:  $n_p = n_s = n_i$ . Мощности генерируемых сигнальной и холостой волн в непрерывном ПГС в полуэмпирической модели равны [1,2]:

$$D_s = \omega_s D_p / \omega_p; \quad D_i = \omega_i D_p / \omega_p. \quad (1)$$

Соотношения (1) полуэмпирической модели согласуются с экспериментом [1,2] и находят подтверждение в более полных теоретических моделях непрерывных ПГС. Наиболее близкая теоретическая модель представлена в работе [3]. Дополнительно к обоснованию соотношений (1), теория [3] предлагает универсальную связь остаточной мощности накачки  $\delta_p$  с пороговой мощностью накачки  $P_{th}$ :

$$\delta_p = P_{th}. \quad (2)$$

Справедливость соотношения (2) проверена в настоящей работе экспериментально. При этом обнаружено, что остаточная мощность накачки  $\delta_p$  оказывается систематически меньше пороговой мощности накачки  $P_{th}$ . Так, в приведенном выше примере энергетических характеристик ПГС при  $P_p = 10$  Вт, остаточная мощность составляет  $\delta_p = 0.6$  Вт, что примерно в два раза меньше пороговой мощности накачки.

Согласно теории [3] соотношение  $\delta_p = P_{th}$  следует считать независимым от мощности накачки при  $P_p > P_{th}$ . Эксперимент, однако, обнаруживает монотонное уменьшение остаточной мощности накачки от  $\delta_p = P_{th}$  до  $\delta_p = P_{th}/2$  при увеличении мощности накачки от порогового значения до  $P_p = 12$  Вт. Таким образом, равенство остаточной и пороговой мощностей накачки,  $\delta_p = P_{th}$ , предсказанное в работе [3], не подтверждается пока нашими экспериментами. Причины этого еще предстоит выяснить.

### Литература:

1. М.Д. Яковин, П.Л. Чаповский, Непрерывный параметрический генератор света для средней ИК области, Квантовая электроника, т. **52**, № 6, 549-554 (2022). DOI: 10.1070/QEL18066
2. П.Л. Чаповский, Моделирование энергетических характеристик непрерывного ПГС для средней ИК области, X Международный семинар по волоконным лазерам, Новосибирск, Академгородок, 15-19 августа, 2022, Материалы семинара, стр. 77-78. DOI: 10.31868/RFL.2022.77-78.
3. A. Yariv, W.H. Louisell, IEEE J. Quantum Electronics, **QE-2**, 418-424 (1966)

## 2. Исследование интерференции в открытых квантовых системах в присутствии петель обратной связи и причинных петель

**Расширение новой концепции описания квантовых систем с причинными петлями с отдельных кубитов на системы квантовой оптики – многофотонные состояния электромагнитных мод с взаимодействиями между ними.**

В рамках toy-model пространства-времени нетривиальной топологии, допускающей замкнутые времениподобные и изотропные мировые линии (см. Рис.5), рассмотрена эволюция компактной квантованной электромагнитной моды. Сравниваются последствия принятия онтологической или эпистемологической концепций квантового состояния моды на предсказываемой картине эволюции. Это сделано в рамках двух альтернативных трактовок эволюционной схемы – модели Дойча D-СТС (онтологической) и модели S-СТС (эпистемологической). Рассчитаны состояния моды в будущем по отношению к причинной петле при

одинаковых состояниях в прошлом в обеих моделях для двух типов взаимодействия моды со своей более старой версией, пришедшей из будущего. В первом типе взаимодействие мод сводится к обмену квантами, а во втором – к взаимодействию в нелинейной среде в присутствии мощного классического излучения. Обнаруженные различия предсказаний представляется важным в контексте будущей фундаментальной теории, объединяющей квантовую физику и гравитацию. (работа A.V. Shepelin, V.A. Tomilin., L.V. P'ichov *Photonic Mode in a Causal Loop: Comparison of D-CTC and S-CTC Models* в редакции журнала Гравитация и Космология)

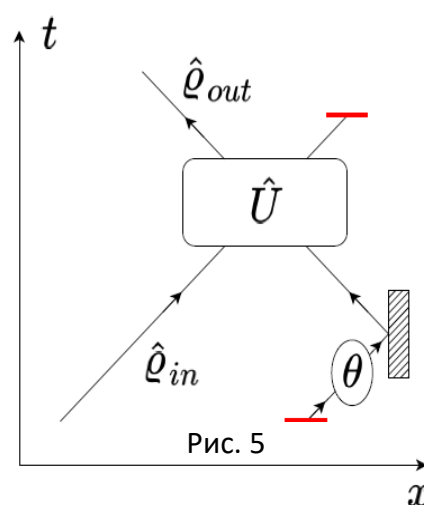


Рис. 5

### **Гибридная атомарно-оптическая квантовая гироскопия.**

Дальнейшее развитие получила идея гибридного атомарно-оптического квантового гироскопа, главным элементом которого является кольцевая структура бозе-эйнштейновского конденсата атомов. Зондирующее оптическое излучение обеспечивает чувствительность системы к вращению и регистрирует в режиме оптической

интерферометрии реакцию конденсата на вращение (см. Рис.6). Процесс измерения угловой скорости вращения гироскопа может в идеале осуществляться без потери атомов, но неизбежно приводит к деградации пространственной когерентности конденсата. Построена математическая модель этого принципиально важного явления. Выведено квантовое управляющее уравнение для состояния конденсата и получено его аналитическое решение при относительно медленной декогеренции [4].

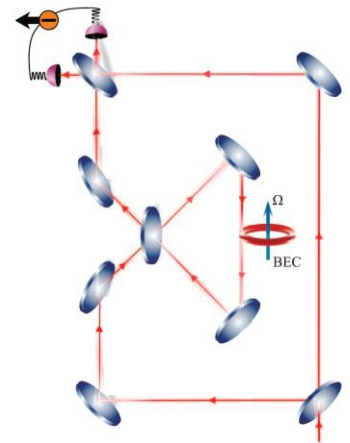


Рис. 6

**Геометрическая фаза как основа квантовой гироскопии.**

Предложена новая перспективная концепция квантовой гироскопии [5]. В новой схеме, как и в ряде других, чувствительными к вращению элементами служат кольцевые конфигурации конденсата, нарушенные на некотором своем участке дополнительным потенциалом–дефектом. Предлагается регистрировать не фазу Саньяка, возникающую в кольцевых структурах когерентных ансамблей атомов, а специфическую геометрическую фазу, порождённую вращением системы отсчёта устройства. Для этого необходима форма «дефекта», задающая ориентацию на кольцевой структуре конденсата. Варьирование формы

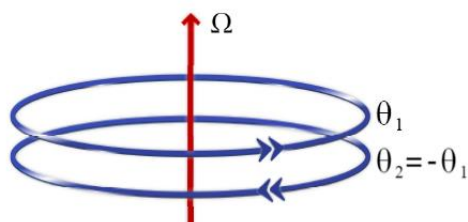


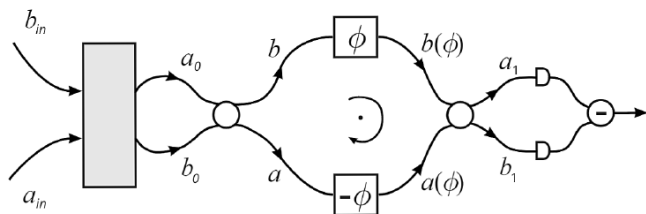
Рис. 7

«дефекта» по замкнутому контуру в пространстве его параметров порождает геометрическую фазу, пропорциональную числу атомов в кольцевой структуре и максимальная при нормальной ориентации вектора угловой скорости вращения

относительно плоскости кольца. В аналогичной структуре с противоположной ориентацией «дефекта» порождается противоположная геометрическая фаза (см. Рис.7). Если обе структуры содержат единый конденсат, его состояние демонстрирует квантовые корреляции (запутанность) по распределению атомов между двумя ансамблями. Геометрическая фаза модифицирует амплитуды вероятности в суперпозиции различных распределений и, следовательно, картину интерференции волн материи, испущенных из обеих кольцевых структур. При этом компенсируются вклады динамической фазы, не имеющие непосредственного отношения к вращению.

**Оптическая квантовая гироскопия с ориентацией на шум.**

В процессе поиска новых систем квантовой метрологии для нужд автономной инерционной навигации была предложена и исследована перспективная схема квантового оптического гироскопа на основе интерферометра Маха-Цандера [6]. На его входы



подаётся излучение в состоянии двухмодового сжатого вакуума (см. Рис8). Разностный сигнал на выходе оказывается нечувствительным к вращению, и его

Рис. 8

среднее значение всегда равно нулю. Дисперсия сигнала,

т.е. его шум, оказывается пропорциональной модулю синуса половины фазы Саньяка, определяемой эффективной площадью интерферометра. Анализ квадратичной дисперсии шума выявил возможность достижения предела Гейзенберга в неточности измерения абсолютной величины проекции вектора угловой скорости на нормаль к плоскости интерферометра. Как достоинство предлагаемой схемы следует отметить её нечувствительность к возможной потере когерентного характера (квантовой спутанности) входного состояния. Также данная схема явно выигрывает перед известной из публикаций альтернативной схемой использования двухмодового сжатого вакуума для достижения предела Гейзенберга в фазовых измерениях, основанной на определении чётности числа фотонов в выходном канале интерферометра. Был проведён поиск оптимального режима работы гироскопа на основе анализа зависимости информации Фишера от величины параметра сжатия.

**Квантовая обратная связь вне контролируемой системы.**

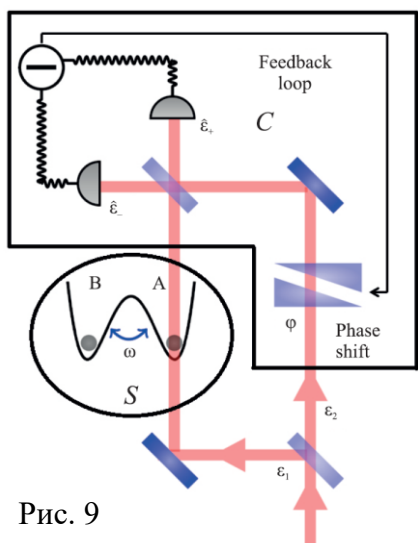


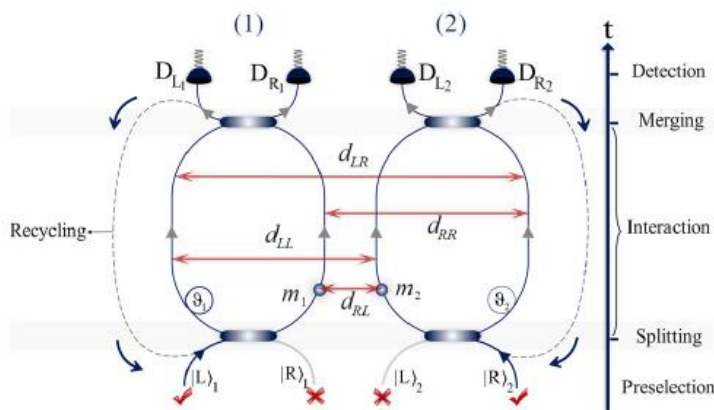
Рис. 9

Предложен новый метод управления квантовыми системами при помощи обратной связи [7]. Обратная связь не затрагивает параметры самой управляемой системы, а меняет информационное содержание ее контактов с окружением (меняет так называемое “распутывание” квантовой операции, описывающей эти контакты). В качестве примера рассмотрена задача об управлении состоянием двухмодового атомарного конденсата Бозе-Эйнштейна, одна из мод которого подвергается фазо-контрастному зондированию в интерферометре Маха-Цандера (см. Рис.9). Различные “распутывания” операции

фотодетектирования осуществляются при помощи изменения фазового сдвига в свободном от конденсата плече интерферометра. Выведено кинетическое уравнение, описывающее эволюцию состояния конденсата с учетом обратной связи, и на основе его стационарного решения рассчитано расхождение Кульбака–Лейблера между распределениями атомов по модам с обратной связью и в ее отсутствие. Показано, что это расхождение достигает максимума при нетривиальных значениях задающих распутывание параметров.

**Роль деструктивной интерференции в гравитационно-индуцированной запутанности.**

Гравитационно-индуцированная запутанность является типом квантовой запутанности, которая может быть создана между двумя мезоскопическими частицами с



помощью их ньютоновского гравитационного взаимодействия (см. Рис.10). Она привлекла большое внимание как новая платформа для изучения квантовых аспектов гравитации. В работе [8] анализируется гравитационно-индуцированная запутанность как чисто

Рис. 10

интерференционный эффект и показывается, что запутанность

вызвана исключительно сменой знака, связанной с деструктивной квантовой интерференцией. Также показано, что когда запутанность не максимальна, условия деструктивной интерференция для одной из частиц могут восстановить максимальную видимость интерференционная картина для другой частицы. Поэтому не максимально запутанное состояние может быть чрезвычайно эффективным для экспериментального тестирования, поскольку оно может помочь в снижении требований по массам частиц и продолжительности их взаимодействия и одновременно сохранить информацию о запутанности. Продемонстрировано улучшение отношения сигнал/шум и определены минимальные требования к экспериментальным испытаниям.

### 3. Теоретическое исследование работы лазера на метастабильных атомах инертных газов с поперечной диодной накачкой

На основе пятиуровневой модели атомов активной среды (схема уровней показана на рис.11) разработана аналитическая модель лазера на метастабильных атомах инертных газов с поперечной диодной накачкой.

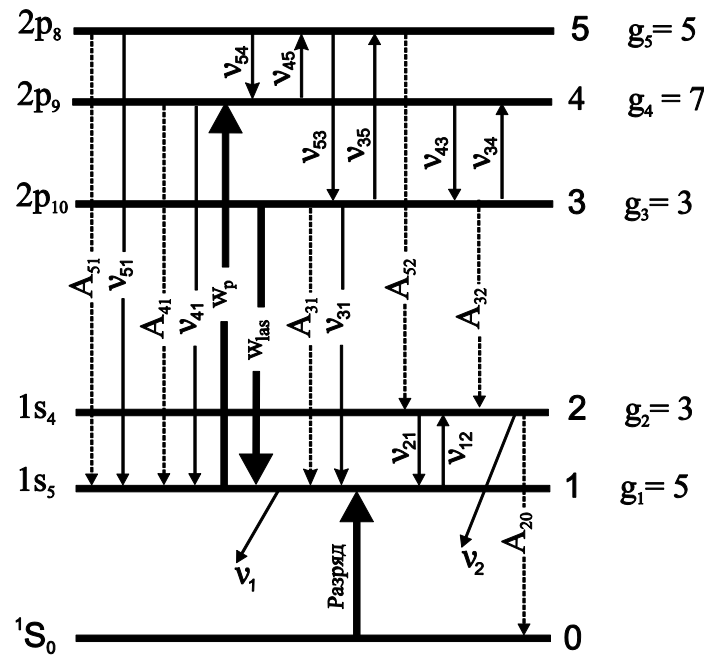


Рис.11. Схема рабочих уровней и переходов в атомах инертных газов.

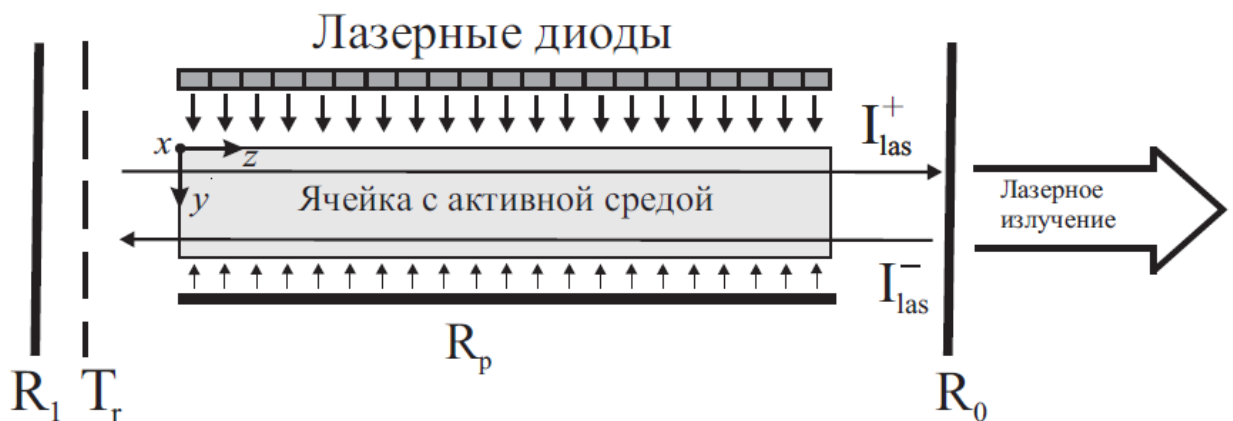


Рис. 12. Схема лазера с поперечной диодной накачкой.

Работа лазера (его схема представлена на рис. 12) описывается сложной системой дифференциальных уравнений, которая в общем случае поддается решению только численными методами. При не слишком малом коэффициенте отражения выходного зеркала

$R_0$  населенности уровней атомов активной среды практически не зависят от координаты  $z$  вдоль оси ячейки. В этом приближении система дифференциальных уравнений сильно упрощается и допускает аналитическое решение, которое позволяет исчерпывающе определить любые энергетические характеристики лазера.

Расчеты по аналитическим формулам показывают, что эффективность преобразования излучения накачки в лазерное излучение тем больше, чем выше интенсивность излучения накачки и чем меньше ширина спектра излучения накачки. Существуют оптимальные значения параметра  $Ny_0$  (число активных атомов в ячейке в столбе газа высотой  $y_0$  с единичным поперечным сечением), при которых максимум как функции давления буферного газа имеет наибольшее значение.

На рис.13 показаны результаты расчетов эффективности преобразования излучения накачки в лазерное излучение  $P_{las}^{out} / P_{0p}$  в зависимости от давления буферного газа гелия  $p_{He}$  при различных значениях интенсивности излучения накачки  $I_{0p}$  на входе в ячейку.

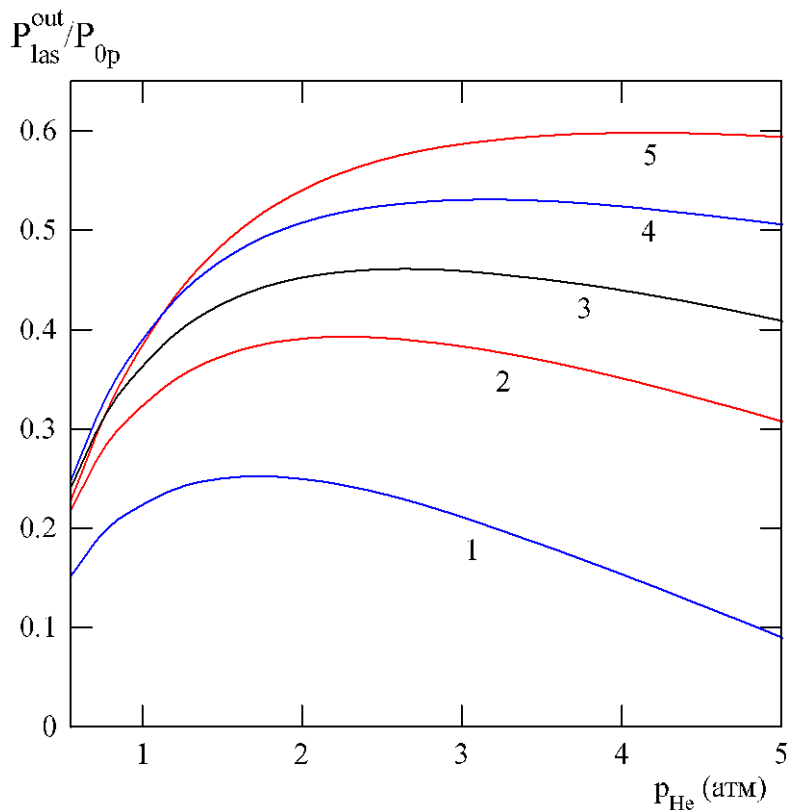


Рис.13. Зависимости эффективности преобразования от давления буферного газа гелия  $p_{He}$  при оптимальных значениях параметра  $Ny_0$ ,  $T=300$  К,  $p_{Ar}=20$  Тор,  $\Delta\omega/(2\pi c)=1$   $\text{см}^{-1}$ ,  $R_1=R_p=1$ ,  $R_0=0.5$ ,  $T_i=0.99$ ,  $z_0/y_0=5$  и различных интенсивностях излучения накачки:  $I_{0p}=0.1$   $\text{кВт/см}^2$ ,  $Ny_0=1.3 \times 10^{13}$   $\text{см}^{-2}$  (1);  $I_{0p}=0.2$   $\text{кВт/см}^2$ ,  $Ny_0=2.1 \times 10^{13}$   $\text{см}^{-2}$  (2);  $I_{0p}=0.3$   $\text{кВт/см}^2$ ,



$N_{y0}=2.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (3);  $I_{0p}=0.5 \text{ кВт/см}^2$ ,  $N_{y0}=3.3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (4);  $I_{0p}=1 \text{ кВт/см}^2$ ,  $N_{y0}=4.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (5).

При реалистичных параметрах рабочей среды и излучения накачки эффективность преобразования достигает 60% при  $N_{y0}=4.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , давлении буферного газа 4.1 атм, интенсивности излучения диодов накачки  $1 \text{ кВт/см}^2$  и полуширине спектра излучения накачки  $1 \text{ см}^{-1}$ . При этом средний удельный съем мощности лазерного излучения с активной среды составляет примерно  $200 \text{ Вт/см}^3$ . При объеме рабочей среды  $50 \text{ см}^3$  выходная мощность лазерного излучения достигает 10 кВт.

Результаты отражены в публикациях [9, 10].

#### ***4. Расчеты магнитооптических спектров флуоресценции при поглощении монохроматического излучения резонансного перехода на второй возбужденный уровень на примере атомов щелочных металлов.***

Проведены расчеты магнитооптических спектров флуоресценции при поглощении монохроматического излучения резонансного перехода на второй возбужденный уровень. В качестве исследуемого атома был выбран атом  $^{39}\text{K}$ , схема уровней которого показана на рисунке 14. Поляризованное лазерное излучение индуцирует переход с основного уровня  $4s^2S_{1/2}$  на второй возбужденный уровень  $5p^2P_{3/2}$ .

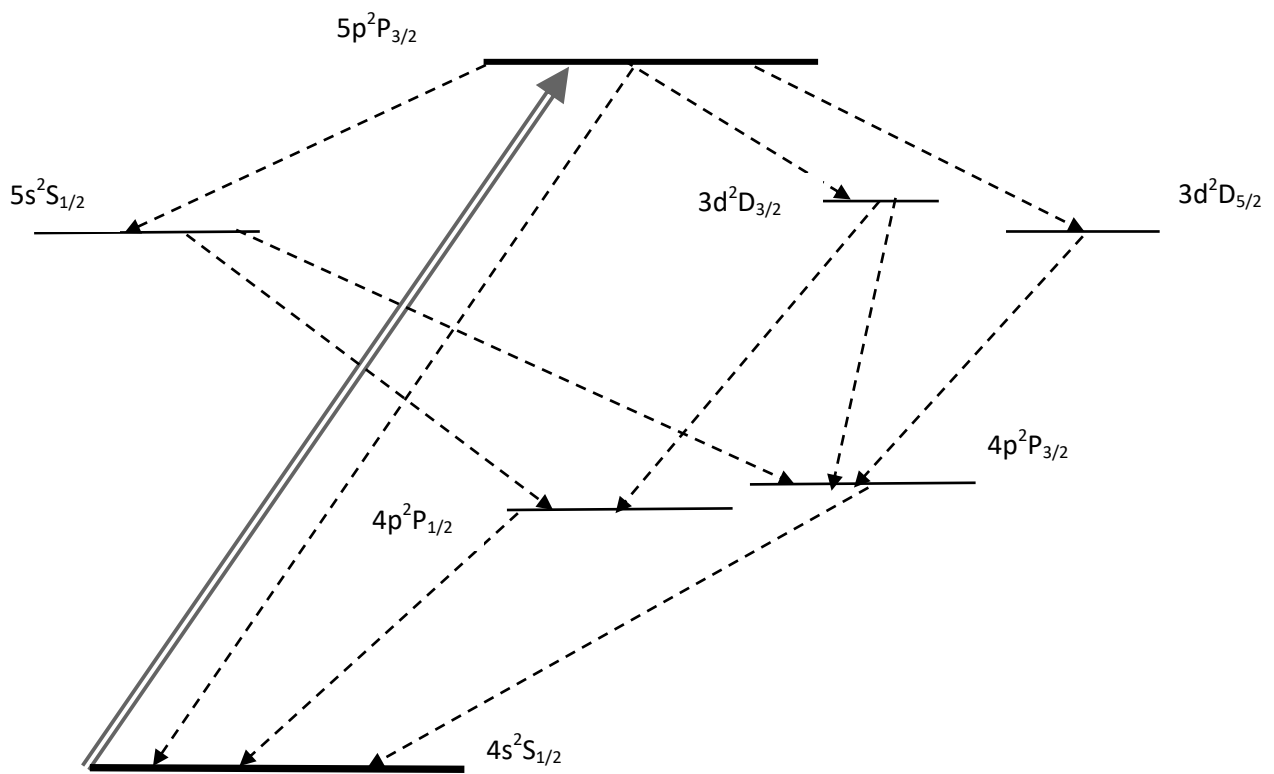


Рис.14. Схема оптических переходов в атоме  $^{39}\text{K}$  при лазерном возбуждении на второй резонансный уровень.

При возбуждении второго резонансного уровня калия распад идет не прямо в основное состояние, а большей частью через промежуточные состояния  $5s^2S_{1/2}$ ,  $3d^2D_{3/2}$ ,  $3d^2D_{5/2}$ ,  $4p^2P_{1/2}$ ,  $4p^2P_{3/2}$ . При распаде через дополнительные каналы происходит перемешивание по M-состояниям и, возможно, разрушение когерентности между ними. Как следствие, магнитооптический резонанс может отсутствовать при таком возбуждении. Для исследования этого вопроса при учете всех этих процессов была разработана принципиально новая математическая модель и ее численная реализация для моделирования магнитооптических резонансов.

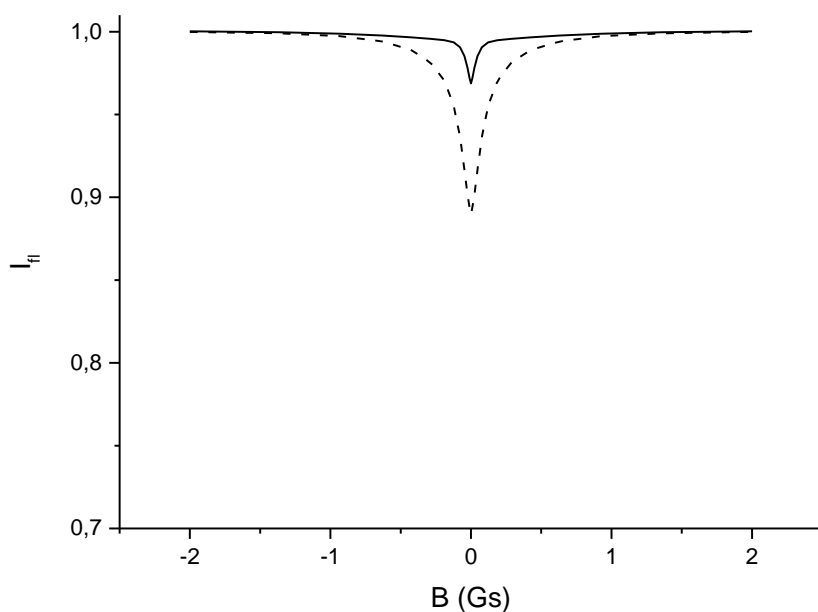


Рис. 15. Расчетный график магнитооптического резонанса для модели, в которой учитываются дополнительные каналы распада (сплошная линия) и в отсутствии этих каналов (штриховая линия).

На примере атома  $^{39}\text{K}$  численным моделированием показано, что дополнительные каналы распада со второго возбужденного уровня лишь могут уменьшить контраст магнитооптического резонанса, но не могут предотвратить образование когерентности М-подуровней атома в основном состоянии атома при взаимодействии с поляризованным излучением. Этому факту было дано качественное объяснение.

Результаты исследований оформлены в виде статьи и посланы в журнал Автометрия. К.А. Насыров. Особенности магнитооптических спектров флуоресценции при поглощении поляризованного излучения на переходе на второй резонансный уровень в атомах щелочных металлов. Автометрия.

## Заключение

**По блоку 1:** Создание автоматизированного спектрометра в среднем ИК диапазоне на основе непрерывного параметрического генератора света (ПГС).

Создан непрерывный ПГС для средней ИК области. Зеркала кольцевого резонатора ПГС имеют высокий коэффициент отражения для сигнальной волны и предельно малые

коэффициенты отражения для накачки и холостой волн. Частота холостой волны ПГС стабилизирована с помощью прецизионного измерителя длин волн лазерного излучения WS-6-IR3 (фирма Ангстрем, Новосибирск). Важной особенностью созданного ПГС является защита кольцевого резонатора от потоков воздуха с помощью пластикового канала с малым поперечным сечением, напечатанного на 3D принтере.

**По блоку 2:** *Исследование интерференции в открытых квантовых системах в присутствии петель обратной связи и причинных петель.*

В задаче сопоставления трактовок понятия квантового состояния можно констатировать, что схема Дойча действительно чувствительна к выбору парадигмы и в случае кубитов, и в случае фотонных мод – предсказания D-СТС и S-СТС в общем случае различаются. Полученные результаты представляются важными как предварительные реперы в контексте перспективы создания последовательной квантовой теории эволюции информации в пространстве-времени с нетривиальной топологией. Следует отметить непростую картину сходства и различий предсказаний сравниваемых моделей и её зависимость от выбора формы взаимодействия мод.

Полученное кинетическое уравнение для состояния конденсата в гибридном атомарно-оптическом квантовом гироскопе и, что самое главное, определение значений входящих в него параметров позволило провести численные оценки состояния зондирующего пучка во вспомогательном кольцевом резонаторе, где пучок взаимодействует с конденсатом. Скорость декогеренции последнего оказалось довольно низкой:  $10^{-2} \div 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Этот оптимистичный результат свидетельствует, однако, о малом среднем числе фотонов в кольцевом резонаторе и, соответственно, о сильных квантовых флуктуациях потенциала «дефекта». Корректный учёт этих флуктуаций потребовал трансформации исходной теоретической модели с введением квантового описания зондирующего пучка в резонаторе.

Сформирована концепция квантовой гиromетрии, ориентированной на генерацию и наблюдения специфической геометрической фазы в атомарном конденсате. Построен математический аппарат новой модели гиromетра на основе формализма трансфер-матриц при описании потенциалов–дефектов в кольцевых структурах конденсата. Вычислено значение геометрической фазы в модели «дефекта», использующей пару стандартных трансфер-матриц, с пространством параметров в виде поверхности бесконечного цилиндра. Обнаружена возможность достижения оптимальной для регистрации геометрической фазы, равной  $\pi$ , для разных угловых скоростей вращения путём надлежащего выбора контура

обхода в пространстве параметров потенциала-дефекта (для кольцевой структуры конденсата диаметром 0.5 см, детектирующей вращение Земли вокруг своей оси).

Предложена перспективная схема квантового оптического гиromетра на двухмодовом сжатом вакууме. Показана достижимость гейзенберговского предела в неточности измерения фазы Саньяка на примере детектирования вращения Земли вокруг своей оси волоконно-оптическим гироскопом стандартных размеров. Проведён аналитический и численный расчёт классической и квантовой информации Фишера как функций параметра сжатия и доказано их совпадение. Установлено достижение максимальных значений информации Фишера для значений параметра сжатия  $\sim 3.68$ , что соответствует диапазону достижения предела Гейзенберга.

Рассмотренная модель интерферометрического контроля состояния атомарного бозе-конденсата с помощью системы обратной связи демонстрирует контринтуитивное поведение. Есть основания толковать его как исключительно квантовое явление: во-первых, понятие распутывания отсутствует в классике; во-вторых, зондирующее излучение, как неотъемлемая часть системы обратной связи, демонстрирует в нашей модели и волновые, и корпускулярные свойства. Первые позволяют вносить фазовые сдвиги в пучки, а вторые позволяют оперировать с хорошо локализованными во времени событиями фоторегистраций и привязывать к ним переключения фазовых сдвигов (переключения распутываний).

**По блоку 3:** *Теоретическое исследование работы лазера на метастабильных атомах инертных газов с поперечной диодной накачкой*

При реалистичных параметрах рабочей среды и излучения накачки эффективность генерации достигает 60% при  $N_{y0}=4.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , давлении буферного газа 4.1 атм, интенсивности излучения диодов накачки  $1 \text{ кВт/см}^2$  и полуширине спектра излучения накачки  $1 \text{ см}^{-1}$ . При этом средний удельный съём мощности лазерного излучения с активной среды составляет примерно  $200 \text{ Вт/см}^3$ . При объёме рабочей среды  $50 \text{ см}^3$  выходная мощность лазерного излучения достигает 10 кВт.

**По блоку 4:** *Расчеты магнитооптических спектров флуоресценции при поглощении монохроматического излучения резонансного перехода на второй возбужденный уровень на примере атомов щелочных металлов.*

На примере атома  $^{39}\text{K}$  численным моделированием показано, что дополнительные каналы распада со второго возбужденного уровня не могут полностью предотвратить образование когерентности M-подуровней атома в основном состоянии атома при

взаимодействии с поляризованным излучением. Как итог, магнитооптический резонанс, хоть и уменьшается по амплитуде, но не радикально.

### Список использованных источников

1. М.Д. Яковин, П.Л. Чаповский, Непрерывный параметрический генератор света для средней ИК области, Квантовая электроника, т. 52, № 6, 549-554 (2022). DOI: 10.1070/QEL18066.
2. П.Л. Чаповский, Моделирование энергетических характеристик непрерывного ПГС для средней ИК области. X Международный семинар по волоконным лазерам, Новосибирск, Академгородок, 15-19 августа, 2022, Материалы семинара, стр. 77-78. DOI: 10.31868/RFL.2022.77-78.
3. A. Yariv, W.H. Louisell, IEEE J. Quantum Electronics, QE-2, 418-424 (1966).
4. В.А.Томилин, Л.В.Ильичёв, Декогеренция конденсата в гибридном атомарно-оптическом квантовом гироскопе // ЖЭТФ, 2022, Т.162, С.331 doi: 10.31857/S004445102209005X
5. А.М.Ростом, В.А.Томилин, Л.В.Ильичёв, Геометрическая фаза как основа квантовой гироскопии // ЖЭТФ, 2022, Т.162, С.307 doi: 10.31857/S0044451022090024
6. I.I.Krasionov, L.V.Ilichev, Noise-oriented quantum optical gyrometry // Quantum Electronics, 2022, V.52 (2), P.127 doi: 10.1070/QEL17979
7. В.А.Томилин, Л.В.Ильичёв, Квантовая обратная связь вне контролируемой системы // Письма в ЖЭТФ, 2022, Т.116, С.628 doi: 10.31857/S123456782221011X
8. A.M.Rostom, Essential role of destructive interference in the gravitationally induced entanglement // Fortschritte der Physik, 2022 doi: 10.1002/prop.202200122
9. Пархоменко А.И., Шалагин А.М. Двухуровневый газовый лазер с поперечной диодной накачкой. // Квантовая электроника. 2022. Т. 52, № 5. С. 426-436. DOI: 10.1070/QEL18038.
10. Пархоменко А.И., Шалагин А.М. Аналитическая модель лазера на метастабильных атомах инертных газов с поперечной диодной накачкой. // Квантовая электроника. 2022. Т. 52, № 10. С. 869-877. <http://mi.mathnet.ru/qe18101>

## Приложение (план исследований в 2023 году по проекту)

### **Блок 1.**

**2023 г.: Исследование ядерных спиновых изомеров молекул при возбуждении их колебательно-вращательных переходов мощным излучением параметрического генератора света (ПГС) в среднем ИК диапазоне.**

#### **Ожидаемый результат:**

*С помощью созданного ранее спектрометра будут исследованы ядерные спиновые изомеры молекул этилена. Будет получено обогащение изомеров этилена и исследованы механизмы конверсии ядерных спиновых изомеров этилена.*

### **Блок 2.**

**2023 г.: Расширение новой концепции описания квантовых систем с причинными петлями с отдельных кубитов на системы квантовой оптики – многофотонные состояния электромагнитных мод с взаимодействиями между ними.**

#### **Ожидаемый результат:**

*Будут исследованы многофотонные состояния электромагнитных мод с взаимодействиями между ними с точки зрения задач квантовой информатики в условиях нестандартной структуры причинных связей.*

### **Блок 3.**

**2023 г.: Теоретическое исследование работы усилителя лазерного излучения на метастабильных атомах инертных газов с поперечной диодной накачкой.**

#### **Ожидаемый результат:**

*Будут выяснены оптимальные условия для работы усилителя лазерного излучения на метастабильных атомах инертных газов с поперечной диодной накачкой.*