

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**на диссертацию Литвинова Андрея Николаевича**  
**«Нелинейные оптические резонансы при возбуждении квантовых систем**  
**многочастотным лазерным излучением в средах с различной оптической**  
**плотностью»,**  
**представленную на соискание степени доктора физико-математических**  
**наук,**  
**специальность 01.04.21 – Лазерная физика**

Изучение нелинейных оптических резонансов представляет интерес как в плане получения новых фундаментальных знаний о взаимодействии лазерного излучения со средой, так и создаёт новые возможности улучшения характеристик метрологических устройств, использующих нелинейные оптические резонансы в качестве реперных. Взаимодействие электромагнитного поля с атомом является одной из наиболее фундаментальных проблем квантовой оптики. При взаимодействии атомной среды с бихроматическим лазерным излучением может возникать эффект когерентного пленения населённостей (КПН), который заключается в том, что под действием двух оптических полей атомная система переходит в особое состояние, не взаимодействующее с приложенными оптическими полями. Эффект КПН приводит к возникновению в спектре поглощения атомной системы относительно узкого резонанса, ширина которого может быть на несколько порядков меньше естественной ширины линии атома. Малая ширина резонанса КПН позволяет эффективно его использовать в различных прецизионных приложениях в области квантовых стандартов частоты и времени, квантовых магнитометров, и других. В связи с этим исследование явления КПН вызывает высокий научный и практический интерес, что обусловлено перспективами как использования эффекта КПН в качестве основы приборов квантовой электроники, так и исследования новых физических эффектов, проявляющихся в условиях явления КПН. Изучению явления КПН в ячейках посвящено относительно много работ, однако эта тема исследований по-прежнему остаётся актуальной в связи с не до конца изученной физикой процессов, возникающих

при наличии квантовой интерференции атомных состояний, а также в связи с бурным развитием технологий полупроводниковых лазеров, газовых ячеек, электронных компонентов, что ведёт к разработке и созданию более совершенных устройств, использующих эффект КПН.

Диссертационная работа А.Н.Литвинова посвящена изучению нелинейных оптических резонансов при различном типе возбуждений в средах с различной оптической плотностью. Показано, что распространение лазерного излучения в оптически плотной атомной среде при наличии двух- или трёх-фотонного резонансного поглощения приводит к ряду новых физических явлений, представляющих фундаментальный и практический интерес. В диссертации детально изучены нелинейные оптические резонансы в парах щелочных металлов при учёте краевых эффектов, связанных с конечными размерами газовой ячейки; при наличии оптически плотной среды; при наличии зеемановской и сверхтонкой структуры атома; при возбуждении непрерывными и импульсными лазерными полями.

Автором диссертации уделено специальное внимание практическому применению результатов. К таким результатам может быть отнесена разработанная модель микроволнового квантового стандарта частоты, а также модель гироскопа на атомном спине с оптическим детектированием. На основе этих моделей проведена многофакторная оптимизация параметров работы данных устройств с целью нахождения наиболее оптимальных режимов их работы.

Можно выделить наиболее важные результаты диссертации:

- Выявлена слабая зависимость формы резонанса КПН от наличия или отсутствия стеночного покрытия ячейки в случае накачки атомов лазером с относительно узким спектром. Предложен новый способ формирования резонанса КПН, позволяющий использовать ячейки без антирелаксационного покрытия и без буферного газа, что позволяет существенно упростить технологию изготовления ячеек и устройств на их основе.

- Проведено обобщение теории взаимодействия бихроматического лазерного излучения с щелочными атомами на случай, когда лазерное излучение является немонахроматичным. Исследовано влияние конечной оптической толщины на форму линии резонанса когерентного пленения населенностей и обнаружены нетривиальные спектральные свойства прошедшего через ячейку излучения. Одним из наиболее ярких результатов является обнаружение эффекта спектральной фильтрации лазерного излучения.
- Разработана теория переноса немонахроматического излучения через ячейку с щелочными и буферными атомами при наличии радиочастотного излучения, формирующего замкнутый контур возбуждения. На основе данной теории обнаружено, что имеется область параметров, где наблюдаются пространственные квазипериодические осцилляции интенсивности излучения. Исследовано влияние различных факторов, таких как немонахроматичность лазерного излучения, движение атомов, наличие поглощения в среде на эти осцилляции.
- Проведён детальный анализ световых сдвигов резонанса КРН в оптически плотных средах от температуры, ширины спектра лазерного излучения, интенсивности лазерных полей, различных конфигураций поляризации, а также различных концентраций атомов буферного газа. Предложен метод компенсации световых сдвигов. Обнаружены и проанализированы эффекты дихроизма и двулучепреломления, возникающие при наведении оптической анизотропии в условиях эффекта когерентного пленения населенностей в оптически плотных атомных средах.
- Показано, что в оптически плотной среде световые сдвиги рамсеевских резонансов неэквидистантны по мере увеличения оптической плотности среды. Обнаружен вклад в световой сдвиг, обусловленный сверхтонкой структурой возбуждённого уровня при импульсном возбуждении в оптически плотной среде и предложен метод компенсации светового сдвига.
- Построена модель гироскопа на атомном спине и смоделирован сигнал гироскопа. На основе построенной модели гироскопа объяснён ряд

особенностей, которые наблюдались при экспериментальном исследовании спектральных линий магнитного резонанса.

В целом диссертационное исследование выполнено на высоком научном уровне, с применением современного математического аппарата квантовой механики, электродинамики и статистической физики, а также передовых методов численных расчётов. Тем не менее, к диссертации имеются следующие замечания:

1. В первой главе (п. 1.1.3.2) приведено сравнение с экспериментом разработанной теории резонанса КПН в ячейке конечного размера. Сделан вывод о подтверждении теоретически предсказанных в пункте 1.1.3.1 особенностей, а именно, проявлении эффекта лазерно-индуцированного сужения резонанса КПН при его возбуждении узкополосным лазерным источником. В экспериментах полная ширина на полувысоте узкого пика резонанса КПН составила 30-40 кГц при ширинах линий излучения возбуждающих лазеров 100 кГц и 1,5 МГц. Однако в экспериментах других групп (см., например, Opt. Express, v. 21 (5), 5781-5792 (2013)) существенно меньшая ширина резонанса КПН (~1кГц) наблюдалась при традиционной ширине линии излучения возбуждающего полупроводникового лазера, составляющей несколько десятков МГц. Видимо эффект лазерно-индуцированного сужения резонанса КПН определяется не только шириной линии излучения возбуждающего лазера, но и другими факторами.
2. В первой главе (п. 1.2) исследована зонная накачка щелочных атомов непрерывным излучением в ячейке с антирелаксационным стеночным покрытием, выявлены особенности формирования резонанса КПН в ячейке при зонной накачке, проведено сравнении теории с экспериментом. Однако данный раздел не содержит каких-либо выводов относительно оптимальных параметров зонной накачки, что, безусловно, важно для приложений.
3. Результаты 3-х глав диссертации (главы 2, 3, 5) носят теоретический характер и не имеют детального сопоставления с экспериментами.

Сделанные замечания, однако, не ставят под сомнение обоснованность выбранных подходов для решения рассматриваемых задач. Несмотря на замечания, высокая оценка уровня диссертационной работы полностью сохраняется. Автором была выбрана актуальная тема диссертации, полученные результаты обладают фундаментальной научной новизной и имеют значительную практическую ценность. Диссертация представляет собой законченное научное исследование, вносящее заметный вклад в лазерную физику.

Основные результаты, выносимые на защиту, прошли апробацию и полностью опубликованы в рецензированных изданиях, рекомендованных ВАК. Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации. Диссертация соответствует пунктам 1, 2, 3 и 6 паспорта специальности 01.04.21.

Таким образом, диссертация А.Н. Литвинова «Нелинейные оптические резонансы при возбуждении квантовых систем многочастотным лазерным излучением в средах с различной оптической плотностью» полностью удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Официальный оппонент

Кобцев Сергей Михайлович

доктор физико-математических наук

Заведующий Отделом лазерной физики и инновационных технологий,  
директор Междисциплинарного квантового центра физического факультета  
федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет»

