

В диссертационный Совет 24.1.070.01, созданный на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук»,

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Коваленко Дмитрия Валериевича
"Динамическая спектроскопия сверхузких нелинейных резонансов в бихроматических лазерных полях", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Формирование лазерно-индуцированной когерентности в атомных ансамблях под воздействием многомодового когерентного излучения приводит к целому ряду интересных физических эффектов. Одним из таких эффектов является когерентное пленение населенности (КПН). В простейшем случае КПН может наблюдаться при взаимодействии атомов с бихроматическим полем. В условиях двухфотонного резонанса атомная система переходит в так называемое «темное состояние», которое не взаимодействует с приложенным двухмодовым излучением. Это приводит к появлению в спектрах поглощения узкого резонанса, ширина которого значительно меньше естественной ширины возбужденного состояния.

Наряду с анализом фундаментальных физических закономерностей этого и близких к нему эффектов электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП) и абсорбции (ЭИА) широко обсуждается их возможное практическое применение для задач квантовой магнитометрии, совершенствования устройств телекоммуникации и оптических вычислений, создания новых методов хранения информации, в том числе квантовой. Одним из наиболее важных и перспективных является использование эффекта КПН для стабилизации частоты.

Изучению КПН, ЭИП и ЭИА и их возможных применений посвящено большое число работ. Однако эта область исследований продолжает оставаться актуальной. Сложность физических процессов, имеющих место при интерференции квантовых состояний в условиях нелинейных резонансов обуславливает то, что многие их аспекты либо остаются неисследованными, либо исследованы недостаточно подробно. В частности, в подавляющем большинстве работ эффект КПН анализируется в стационарных условиях. Такой подход оказывается совершенно неприемлемым, например, при описании работы квантовых стандартов частоты, основанных на современных методах рамсеевской спектроскопии. По этой причине диссертационная работа Коваленко Д. В., посвященная анализу нестационарных процессов при формировании сверхузких нелинейных резонансов и их влиянию на характеристики квантовых стандартов частоты, является, несомненно, **актуальной**.

Наиболее интересными и значимыми новыми результатами, полученными в работе, являются следующие:

1. Показано, что для замкнутого оптического дипольного перехода тип резонанса, индуцированного бихроматическим лазерным излучением, не зависит от интенсивностей и поляризаций его частотных компонент. Определяющим, будет ли наблюдаться индуцированная прозрачность или абсорбция является только значения угловых моментов основного и возбужденного состояний. При этом эффект абсорбции связан с появлением анизотропии углового момента в возбужденном состоянии и её переносом в основное в результате спонтанного распада.
2. В схеме синхронного детектирования проведен анализ влияния частоты модуляции двухфотонной отстройки на стабильность КПН-часов. С учетом низкочастотных шумов детектирования указаны оптимальные режимы их работы.
3. Для случая лямбда-схемы атомных уровней доказана возможность подавить полевой сдвиг частоты, стабилизируемой с использованием резонансов КПН. Показано, что методы обобщенной автобалансной рамсеевской спектроскопии и комбинированного сигнала ошибки позволяют это сделать независимо от основных параметров рамсеевских импульсов (амплитуды, формы, фазы), а также констант релаксации, погрешностей при формировании фазовых скачков и т. п.
4. Показано, что неоднородность лазерных пучков приводит к нелинейной зависимости сдвига от интенсивности излучения. Эта зависимость обнаружена для двух основных схем формирования сигнала ошибки дискриминатора частоты – схемы с гармонической модуляцией двухфотонной отстройки и варианта фазовой ступенчатой модуляции. Этот результат имеет важное значение, поскольку нелинейный световой сдвиг невозможно полностью подавить известными схемами автокомпенсации. В диссертации предложен один из возможных вариантов ослабления обнаруженной нелинейной зависимости.

Результаты, полученные в диссертации, **надежно обоснованы**, их достоверность обусловлена корректным применением адекватных методов современной теоретической и математической физики. Численные расчеты выполнены с использованием ряда хорошо апробированных алгоритмов. Полученные результаты детально проанализированы. Ряд результатов проверен в сериях независимых расчетов различными методами. Там, где это возможно, проведено сравнение с имеющимися экспериментальными данными. При этом обнаружено хорошее качественное согласие. Результаты работы неоднократно докладывались на представительных международных и российских конференциях.

Научная и практическая ценность работы определяется тем, что в ней исследован целый ряд новых, ранее неисследованных аспектов нестационарного формирования нелинейных сверхузких резонансов. Полученные при этом результаты могут быть использованы для улучшения метрологических характеристик квантовых стандартов частоты, основанных на эффекте КПН. Особое место, на мой взгляд, здесь занимает обоснование оптимального нестационарного режима формирования КПН-резонансов, а также доказанная автором возможность подавления полевого сдвига таких резонансов в

рамках рамсеевской спектроскопии. Апробированные в диссертации два подхода к теоретическому анализу периодических решений уравнений для матрицы плотности представляют определенный методический интерес. Они могут быть использованы для решения более широкого круга задач спектроскопии нестационарных периодических процессов.

По диссертации имеется несколько **замечаний**:

1. Во второй главе обсуждаются две модели спонтанной релаксации. Однако спонтанные переходы в атомах теоретически описывается достаточно хорошо без использования каких-либо моделей. По-видимому, автор таким образом учитывает характер деполяризации углового момента возбужденного состояния и его влияние на поляризацию основного. Если это так, то это следовало сформулировать более четко, а также пояснить, как эта деполяризация учитывается в уравнениях для $\hat{\rho}^{ee}$.
2. Исследование режимов индуцированного поглощения и абсорбции ограничивается обсуждением закрытых атомных переходов. В реальных атомах большинство переходов не являются изолированными. Было бы интересно понять, насколько сделанные автором выводы могут быть применимы к этому случаю.
3. В диссертации при рассмотрении модельных трех- четырехуровневых систем вводится феноменологический сдвиг частоты часового перехода, позволяющий учесть многоуровневость реальных атомов. Почему-то этот сдвиг в разных разделах обозначен по-разному. Кроме этого, известно, что нерезонансные оптические переходы могут приводить не только к сдвигам, но и к искажению формы резонансов КПН, однако в тексте диссертации отсутствуют какие-либо оценки роли такого искажения.
4. В различных задачах, рассматриваемых в диссертации, вводится константа Γ , отвечающая за релаксацию атомной системы к равновесному состоянию в отсутствие лазерных полей. Автор ограничивается тем, что называет ее скоростью времяпролетной или диффузионной релаксации и приводит для нее лишь простые оценки. Эта константа играет важную роль в эволюции рассматриваемых систем. Я полагаю, что механизмы этой релаксации следовало бы обсудить более подробно.

Данные замечания не являются принципиальными с точки зрения основных результатов, полученных автором, и не влияют на положительное впечатление от работы, которая представляет собой завершенное теоретическое исследование, выполнена на высоком научном уровне и содержит ряд новых и практически значимых результатов, достоверность которых не вызывает сомнений. Содержание диссертации подробно изложено в восьми статьях в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Считаю, что представленная диссертационная работа "Динамическая спектроскопия сверхузких нелинейных резонансов в бихроматических лазерных полях" по актуальности, ценности полученных результатов, научной новизне, практической значимости, объему в полной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями от 20.03.2021), а ее автор, Коваленко Дмитрий Валериевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

профессор высшей школы фундаментальных физических исследований Физико-механического института СПбПУ, доктор физико-математических наук, профессор
«27» февраля 2024 г.

И. М. Соколов

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

<https://www.spbstu.ru>

E-mail: sokolov_im@spbstu.ru

Тел.: (812) 552-95-16

